AKUSTISCHE ZEITSCHRIFT

Erstes Heft | Vierter Jahrgang | Januar 1939

# Schalldämpfung in Rohren und Schläuchen

Von E. Waetzmann† und W. Wenke

Mitteilungen aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule zu Breslau

*(Mit 11 Textabbildungen)*

## § 1. Fragestellung

Eine große Anzahl moderner akustischer Untersuchungen benötigt die Kenntnis der Schallfortpflanzung in Rohren, z. B. die Messung der Hörschwelle des menschlichen Ohres[1]), der Bau von Schall-Meßbrücken[2]), die Einschaltung eines akustischen Übertragungsweges bei großen Lautsprecherübertragungen[3]) oder die Beurteilung guter Blasinstrumente. Außerdem ergeben sich manche interessanten Parallelen zur sog. Vierpoltheorie in der Schwachstromtechnik. Bekannt ist im wesentlichen die Schalldämpfung in starren, glatten Rohren[4]). Hierfür hat KIRCHHOFF eine Theorie aufgestellt, die die tatsächlichen Verhältnisse qualitativ richtig wiedergibt, aber 10—15% zu kleine Werte liefert[5]). Den Einfluß der Wandoberfläche hat TISCHNER bereits bei einer mittleren Frequenz diskutiert[4]). Es soll jetzt über Dämpfungsmessungen an starren, glatten, rauhen und porösen Rohren berichtet werden, sowie über das Verhalten elastischer Schläuche in Abhängigkeit von der Frequenz und von der lichten Weite.

[1]) J. TRÖGER, Physik. Z. 31 (1930), S. 26; W. GEFFCKEN, Ann. Physik 19 (1934), S. 829; E. WAETZMANN und L. KEIBS, Ann. Physik 22 (1935), S. 247.

[2]) K. SCHUSTER, Elektr. Nachr.-Techn. 13 (1936), S. 164.

[3]) J. VON BRAUNMÜHL, Z. techn. Physik 17 (1936), S. 12.

[4]) H. OBERST, Akust. Z. 2 (1937) S. 76; H. TISCHNER, Elektr. Nachr.-Techn. 7 (1930), S. 193 und 242; K. O. LEHMANN, Ann. Physik 21 (1934).

[5]) G. KIRCHHOFF, Pogg. Ann. 134 (1868), S. 177.

## § 2. Das Meßverfahren

Die Methode soll hier nur kurz erwähnt werden, da sie in einer früheren Veröffentlichung von WAETZMANN und KEIBS angegeben wurde[6]). Schließt man das zu untersuchende Rohr am einen Ende mit einer Schallquelle, am anderen hart ab, und ändert die Rohrlänge $l$ oder die Frequenz $r$ solange, bis die Phase des Druckes $p_a$ am Anfang um $\frac{\pi}{2}$ gegenüber der des Enddruckes $p_e$ verschoben ist, so gilt die Gleichung:

$$(1) \qquad l = n \cdot \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4}.$$

$n$ ist eine beliebige ganze Zahl, $\lambda$ die im Rohr herrschende Wellenlänge. Größe und Richtung der Druckvektoren $p_a$ und $p_e$ werden gemessen. Die Telegraphengleichung für Leerlauf erhält dann die einfache Form:

$$(2) \qquad p_a = i\, p_e \operatorname{Sin} \beta l; \quad \beta = \frac{1}{l} \operatorname{Ar\,Sin} \left| \frac{p_a}{p_e} \right|.$$

Gleichung (1) gestattet aus der Gesamtlänge $l$ auf $\lambda$ und damit auf die Schallgeschwindigkeit $c$ zu schließen. Hierbei birgt die Größe $n$ eine gewisse Unsicherheit, doch genügt im allgemeinen die Feststellung, ob im Rohr eine gerade oder ungerade Anzahl von halben Wellenlängen besteht. Das ist aber eindeutig ersichtlich aus der Änderung des Winkels zwischen $p_a$ und $p_e$ bei der erforderlichen Längen- bzw. Frequenzeinstellung; z. B. ist $n$ gerade, wenn der Winkel mit steigender Rohrlänge bzw. Frequenz wächst und umgekehrt.

[6]) E. WAETZMANN und L. KEIBS , a. a. O.

Die benutzte Meßanordnung ist aus Abb. 1 ersichtlich.

Der Summer speist ein Thermophon ($6\,\mu$ = Wollastondraht) als Schallquelle und außerdem über den Kompensator und linearen Verstärker das Telephonsystem des Kompensationsmikrophons.

Bei geeigneter Einstellung des Kompensators wird die Schalldruckamplitude vor dem Mikrophon *KM* kompensiert. Nach diesem Abgleich wirkt die Mikrophonmembran als harter Abschluß. Steht dessen Membran still, so schweigt der Kopfhörer *T* am Ende der

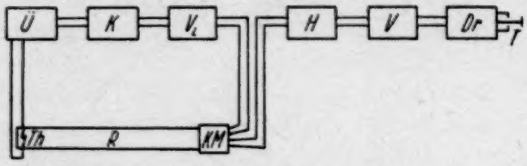



Abb. 1. Meßanordnung

Ü = Überlagerungssummer; K = Kompensator nach W. Geyger; $V_L$ = linearer Verstärker; Th = Thermophon (vor hartem Abschluß); R = Meßrohr; KM = Kompensationsmikrophon nach Geffcken[7]); H = Hochfrequenzschaltung nach Riegger; V = Dreistufiger Verstärker; Dr = Drosselkette; T = Kopfhörer

Schaltung. Meßanordnung und Kompensationsmikrophon wurden mit geringen Abweichungen zuerst von W. Geffcken benutzt; wegen aller Einzelheiten im Aufbau sei auf die entsprechenden Arbeiten verwiesen, sowie auf die Arbeit von Waetzmann und Keibs[7]). Bei der Durchführung der Messung mußte das Kompensationsmikrophon aus technischen Gründen an seinem Platz bleiben; zur Messung von $p_a$ wurde das Thermophon an das gleiche, für $p_e$ an das entgegengesetzte Rohrende geschraubt. Nach jeder Messung eines Wertepaares wurde die Frequenz oder die Rohrlänge solange geändert, bis die Bedingung aus Gleichung (1) erfüllt war. Um das zeitraubende Umschrauben zu ersparen und Schallquelle und Mikrophon zu schonen, wurde versucht, je ein Thermophon am Anfang und am Ende des Rohres abwechselnd zu betreiben. Eine genauere Untersuchung zeigte, daß man wohl den rechten Winkel zwischen den beiden Vektoren auf diese Weise einstellen konnte. Die endgültige Messung mußte aber mit einem Thermophon vorgenommen werden, weil die von den einzelnen Thermophonen gelieferten Druckvektoren in der Richtung gut übereinstimmten, ihre Größe wich aber einige Prozente voneinander ab, so daß dadurch das Verhältnis $\frac{p_a}{p_e}$ gefälscht würde[8]).

Besitzt das Rohr eine oder mehrere Inhomogenitäten, so werden diese eine sehr verschiedene Wirkung auf die Gesamtdämpfung ausüben, je nachdem, ob sie unter dem Einfluß eines Maximums oder Minimums der Schallschnelle bzw. des Schalldruckes stehen. Darum darf hier während einer Messung nicht das Thermophon, sondern nur das Mikrophon seinen Platz am Rohr wechseln, d. h. das Rohr mit der Schallquelle am einen Ende wird im Ganzen umgedreht. Liegt das Thermophon bei einer zweiten Messung am anderen Ende, so fällt an die Stelle eines Druckknotens nun ein Druckbauch, die Gesamtdämpfung hat sich geändert. Der Unterschied zwischen den sich hierbei ergebenden Werten $\beta_1$ und $\beta_2$ bezeichnet die Ungleichmäßigkeit des Rohres und die Unsicherheit der entsprechenden Dämpfungsmessung[9]).

Die Rohre wurden waagerecht eingespannt; die Schläuche durften sich nicht durchbiegen und nirgends anstoßen, sie wurden darum senkrecht aufgehängt in einem verstellbaren Rahmen, der es gestattete, den Schlauch mit der erforderlichen Vorsicht umzudrehen. Seine beiden Enden wurden über je einen Stutzen aus Metallrohr gezogen. Blieben diese klein und einander gleich, so war ihr Einfluß auf die Dämpfung vernachlässigbar[9]).

Am Schluß dieses Paragraphen sei noch ein Meßbeispiel angegeben. Größe und Richtung der Druckvektoren wurden an zwei kalibrierten Drähten des Geygerschen Kompensators abgelesen. (Arch. Elektrotechn. 17 [1927], S. 224). Dieser zerlegt den zu bestimmenden Druckvektor in zwei zueinander senkrechte Komponenten. Ihre Größen sind proportional den

[7]) W. Geffcken, a. a. O., S. 839 und Elektr. Nachr.-Techn. 10 (1933), S. 39; E. Waetzmann und L. Keibs, a. a. O., S. 252.

[8]) Diese Untersuchung führte Herr cand. ing. Keller aus.

[9]) Einzelheiten hierzu siehe die folgende Arbeit von Wenke.

Längen, die an den beiden stromdurchflossenen Drähten abgegriffen werden müssen. Diese sind unterteilt, die Teilung zählt von der Mitte nach beiden Seiten. Man hat also im ganzen vier Skalen, die den Achsen in einem kartesischen Koordinatensystem entsprechen und mit römischen Zahlen bezeichnet sind. Die arabischen Ziffern liefern die zugehörigen Beträge bzw. die abgegriffenen Drahtlängen. Da hier nur ein Druckverhältnis gesucht ist, genügt die Messung in einem Relativmaß. Die Auswertung geschieht am besten graphisch nach Abbildung 2 und nach Gleichung (2).

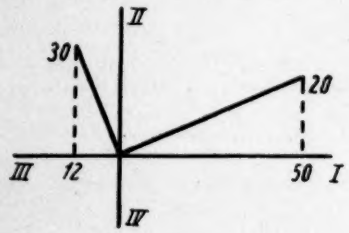



Abb. 2. Meßbeispiel

$$\left.\begin{array}{l} \text{II } 30 \quad \text{III } 12\ p_a \\ \text{I } 50 \quad \text{II } 20\ p_e \end{array}\right\} \sphericalangle (p_a;\ p_e) = 90^0$$

$$\frac{p_a}{p_e} = \frac{33}{53{,}5} = 0{,}617$$

$$\beta l = 0{,}583.$$

Bei sorgfältiger Vermeidung von Undichtigkeiten waren die Ergebnisse gut reproduzierbar, die Apparatur war bis auf 2% zuverlässig.

## § 3. Meßergebnisse an Rohren und Schläuchen mit starren Wänden

Die lichte Weite $(2 \cdot r)$ der untersuchten Rohre betrug 6, 11 und 19 mm. Die schon erwähnten früheren Messungen an Metallrohren wurden z. T. wiederholt und im Frequenzbereich erweitert. Wie Abb. 3 und Tab. 1—3 zeigen, schließen sich diese Ergebnisse sehr gut an die von Waetzmann und Keibs an und sind gut reproduzierbar. Die Abhängigkeit von der Frequenz und dem Radius $r$ wird durch die Kirchhoffsche Formel $\beta = \text{const} \cdot \frac{\sqrt{\nu}}{r}$ richtig wiedergegeben[10]), die theoretischen Werte liegen aber auch hier 10—15% zu tief. Henry zeigt

[10]) G. Kirchhoff, a. a. O.

Tabelle 1
Messingrohr; lichte Weite: 6 mm ⌀

| Frequenz $\nu$ [Hz] | $\beta_{exp.}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] | $\beta_{theor.}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] |
|---|---|---|
| 171 | 1,45 | 1,275 |
| | 1,42 | |
| 320 | 1,95 | 1,74 |
| | 2,0 | |
| | 1,95 | |
| 640 | 2,8 | 2,46 |
| | 2,87 | |
| | 2,79 | |
| | 2,83 | |
| 1024 | 3,6 | 3,12 |
| | 3,6 | |
| | 3,49 | |
| | 3,48 | |
| 1280 | 4,03 | 3,49 |
| | 4,08 | |
| 1512 | 4,3 | 3,82 |
| | 4,35 | |
| | 4,33 | |
| 2048 | 4,95 | 4,4 |

Tabelle 2
Messingrohr; 11 mm

| $\nu$ [Hz] | $\beta_{exp.}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] | $\beta_{theor.}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] |
|---|---|---|
| 171 | 0,784 | 0,695 |
| | 0,8 | |
| 320 | 1,07 | 0,95 |
| | 1,07 | |
| 640 | 1,51 | 1,34 |
| | 1,49 | |
| 1024 | 1,84 | 1,7 |
| | 1,85 | |
| | 1,87 | |
| 1512 | 2,37 | 2,06 |
| | 2,39 | |
| | 2,35 | |
| 2048 | 2,85 | 2,4 |
| | 2,8 | |

Tabelle 3
Stahlrohr; 19 mm ⌀

| $\nu$ [Hz] | $\beta_{exp.}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] | $\beta_{theor.}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] |
|---|---|---|
| 150 | 0,43 | 0,38 |
| 210 | 0,505 | 0,44 |
| 392 | 0,7 | 0,61 |
| 635 | 0,88 | 0,775 |
| 870 | 1 | 0,905 |
| 1110 | 1,15 | 1,03 |
| 1330 | 1,25 | 1,12 |
| 1575 | 1,36 | 1,22 |
| 1835 | 1,45 | 1,32 |
| 2060 | 1,55 | 1,4 |
| 2300 | 1,62 | 1,47 |

in einer ausführlichen Rechnung, daß die KIRCHHOFFsche Theorie für alle starren, glatten Rohre gelten muß, weist aber auf die Möglichkeit hin, daß unregelmäßige Wirbelbewegungen der Luftteilchen in der stehenden Welle die Abweichung im experimentellen Ergebnis verursachen können[11]).

Bei einem Glasrohr mit leicht welligem Längsschnitt und einem Pertinaxrohr mit nicht mehr völlig glatter Innenwand liegt die Dämpfung etwas über der von Metall, wie aus Tab. 4 und 5 ersichtlich ist. Die experimentellen Vergleichswerte der Metallrohre sind überall auf den entsprechenden Durchmesser umgerechnet. Ähnlich verhalten sich zwei Isolierschläuche von

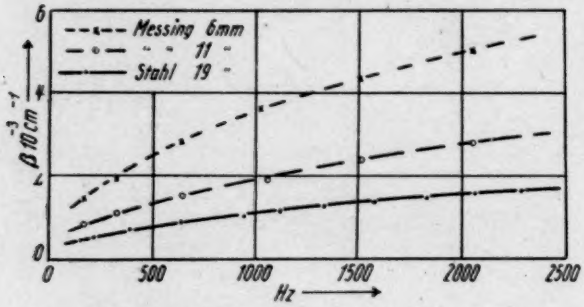



Abb. 3. Schalldämpfung in Metallrohren

Tabelle 4

Glasrohr; 6,6 mm ⌀

| $\nu$ [Hz] | $\beta_{\text{Glas}}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] | $\beta_{\text{Metall}}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] |
|---|---|---|
| 163 | 1,4 | 1,3 |
| 381 | 2,1 | 1,95 |
| 602 | 2,65 | 2,47 |
| 822 | 3 | 2,9 |
| 1040 | 3,39 | 3,27 |
| 1262 | 3,72 | 3,6 |
| 1483 | 3,94 | 3,85 |

Tabelle 5

Pertinaxrohr; 6,9 mm ⌀

| $\nu$ [Hz] | $\beta_{\text{Pertinax}}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] | $\beta_{\text{Metall}}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] |
|---|---|---|
| 234 | 1,57 | 1,48 |
| 550 | 2,45 | 2,25 |
| 865 | 3,05 | 2,85 |
| 1180 | 3,4 | 3,25 |
| 1503 | 3,86 | 3,7 |
| 1960 | 4,4 | 4,2 |

[11]) P. S. H. HENRY, Proc. physic. Soc. 43 (1931); vgl. auch WIEN-HARMS, Hdb. exp. Phys. XVII. 1, S. 306—307.

Tabelle 6

Isolierschlauch; 6 mm ⌀

| $\nu$ [Hz] | $\beta_{\text{Isolierschlauch}}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] | $\beta_{\text{Metall}}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] |
|---|---|---|
| 180 | 1,6 | 1,48 |
| 320 | 2,1 | 1,95 |
| 445 | 2,4 | 2,3 |
| 570 | 2,7 | 2,6 |
| 701 | 3 | 2,9 |
| 830 | 3,3 | 3,15 |
| 960 | 3,54 | 3,4 |
| 1085 | 3,85 | 3,65 |
| 1214 | 4 | 3,85 |
| 1350 | 4,3 | 4,1 |
| 1485 | 4,63 | 4,3 |

Tabelle 7

Isolierschlauch; 10,2 mm ⌀

| $\nu$ [Hz] | $\beta_{\text{Isolierschlauch}}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] | $\beta_{\text{Metall}}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] |
|---|---|---|
| 143 | 0,95 | 0,8 |
| 243 | 1,15 | 1 |
| 343 | 1,4 | 1,2 |
| 442 | 1,55 | 1,33 |
| 539 | 1,68 | 1,5 |
| 637 | 1,92 | 1,63 |
| 735 | 2,19 | 1,75 |
| 840 | 2,28 | 1,85 |
| 936 | 2,45 | 1,97 |
| 1035 | 2,55 | 2,08 |
| 1125 | 2,67 | 2,17 |
| 1228 | 2,92 | 2,3 |
| 1320 | 3,17 | 2,4 |
| 1440 | 3,2 | 2,48 |
| 1536 | 3,33 | 2,6 |

6 und 10 mm Weite mit 0,5 mm Wandstärke. Sie bestehen aus einem dichten Seidengeflecht, das mit einem besonderen Lack imprägniert ist. Gegenüber den geringen Schalldrucken von ca. 0,2—2 $\mu b$ erweisen sie sich starr (Tab. 6 und 7).

Den geringen Einfluß des Wandmaterials zeigten mehrere Papprohre, die uns eine Habelschwerdter Firma liebenswürdigerweise in Längen von 40 cm zur Verfügung stellte und die nachher sorgfältig mit Hülsen bis zu einer Gesamtlänge von 1,60 m zusammengeklebt wurden. Sie waren aus rauhem oder glatten Papier hergestellt und z. T. imprägniert worden. Alle dämpften annähernd gleich stark; ein 11 mm weites Rohr ist in Tab. 8 angegeben. — Besonders stark dämpfte dagegen ein 6 mm weiter, biegsamer Metallschlauch, der in seiner Ver-

wendung als Hülle bzw. Abschirmung elektrischer Leitungen bekannt sein dürfte. Er kann wegen seines luftdurchlässigen Aufbaus porös genannt werden und läßt den Schall bei loser Aufhängung nur halb so gut durch wie in gespanntem Zustande; entscheidend ist demnach die Größe der Luftspalte (Abb. 4). Die Unsicherheit durchInhomogenität lag bei diesen Rohren unter 5%[12]).

Tabelle 8

Papprohr; 11 mm ⌀

| $\nu$ [Hz] | $\beta_{\text{Papprohr}}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] | $\beta_{\text{Metall}}$ [$10^{-3}$ cm$^{-1}$] |
|---|---|---|
| 290 | 1,3 | 1 |
| 780 | 2,04 | 1,66 |
| 1125 | 2,2 | 2 |
| 1490 | 2,65 | 2,34 |
| 1950 | 3 | 2,72 |

Den Einfluß rauher Wände zeigen noch zwei Rohre. Zunächst wurde das bereits erwähnte Stahlrohr 19 · 2 mm (d. h. 19 mm lichte Weite und 2 mm Wandstärke) dick und gleichmäßig mit Leimfarbe ausgegossen und getrocknet. Dadurch bildete sich ein harter Überzug, der wellenförmig bis zu 2 mm in den Querschnitt ragte und von feinen Rissen durchzogen war. Die Dämpfung stieg bis auf den dreifachen Wert, wie Abb. 5 zeigt. $\beta_1$ und $\beta_2$ wichen bis zu 10% voneinander ab, die Farbe war trocken und dauerhaft, denn nach einem halben Jahr hatten sich die Werte noch nicht geändert. Es sei hier auf den Widerspruch zu einer Angabe bei TISCHNER hingewiesen, der bei einem ähnlichen Versuch eine 20fache Dämpfungserhöhung erhielt[13]). In der gleichen Figur ist auch die Dämpfung für ein 19 mm weites glattes und ein rauhes Birkenrohr angegeben. Beide waren aus zwei gefrästen Längshälften zusammengeleimt. Unvollkommenheiten der Leimfugen dürften den großen Unterschied zwischen Stahl- und glattem Holzrohr verursachen, besonders bei tiefen Frequenzen. Abb. 6 zeigt einen kurzen Längsschnitt der beiden Rohre, die aufgekratzten Holzfasern sind deutlich zu erkennen. Der Unterschied in der Dämpfung stieg auch hier nur bis zu 250%;

[12]) Die Messungen dieses Abschnitts führte Herr cand. ing. KELLER aus.

[13]) H. TISCHNER, a. a. O.

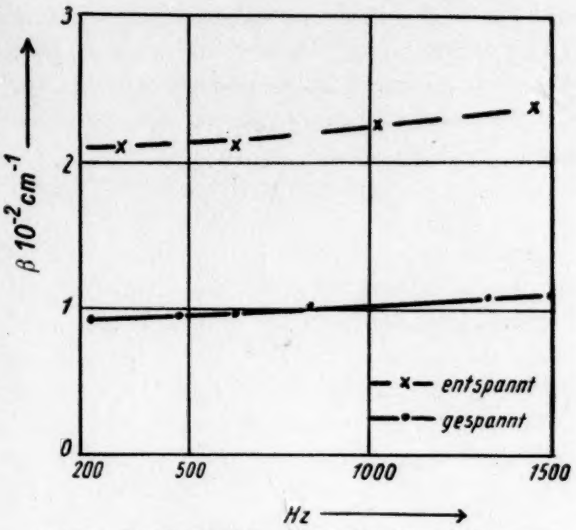



Abb. 4. Schalldämpfung in Metallschlauch 6 mm ⌀

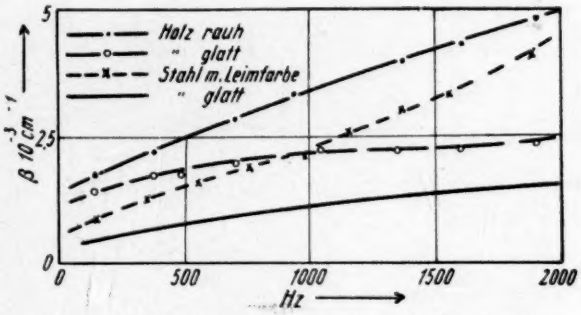



Abb. 5. Schalldämpfung in 19 mm weiten Rohren

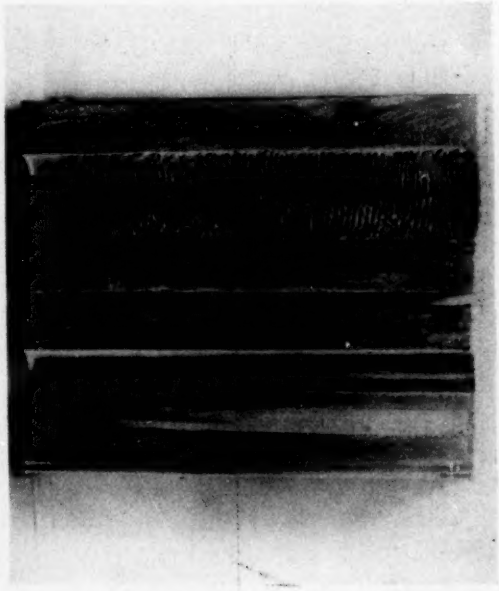


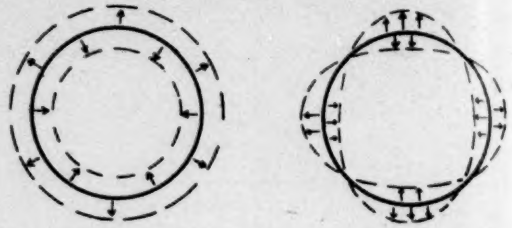
Abb. 6. Längsschnitt durch glattes und rauhes Holzrohr

die Unsicherheit durch Ungleichmäßigkeit im Rohr betrug 8%. Die Schallgeschwindigkeit lag bei den glatten Rohren höchstens 3% unter der im freien Raum. Durch rauhe Innenwände stieg die Abweichung auf 10%.

### § 4. Elastische Schläuche

Aus einer 0,05 mm dicken Ultraphanfolie wurde mit einem Spezialleim ein Schlauch geklebt. Seine lichte Weite betrug 7,3 mm, die um 1 mm schwankte. Die Klebenaht war mit einem weiteren schmalen Ultraphanstreifen abgedichtet. Die Ausführung war recht regelmäßig, denn $\beta_1$ und $\beta_2$ wichen bei verschiedenen Messungen höchstens 15% voneinander ab. Nach zweistündiger Trocknung betrug die Dämpfung bei 1300 Hz 0,1 $cm^{-1}$. Die noch feuchten Stellen konnten dem Schalldruck gut ausweichen, sie waren durch Abhören leicht festzustellen; berührte man sie, so änderte sich der Abgleich am Kompensator deutlich. Nach zwei Tagen betrug die Dämpfung 0,021, nach zwei Wochen 0,008 cm. Der Schlauch wurde nach zwei Tagen gemessen. Die Dämpfung lag bei $7–8 \cdot 10^{-3}$ cm, zwischen 1100 und 1300 Hz stieg sie auf $24 \cdot 10^{-3}$. Nach zwei Wochen hatte sich dieser Anstieg zu höheren Frequenzen verschoben, nämlich zwischen 1300 und 1600 Hz. Diese Erscheinungen erklären sich damit, daß die Wand durch Trocknung steifer wurde und an den unregelmäßigen Stellen bei höheren Frequenzen Biegeschwingungen ausführte; deswegen war dort auch der Schall mit einem Hörschlauch gut abzuhören.

Umfangreiche Untersuchungen wurden an verschiedenen Schläuchen aus heiß vulkanisiertem rotem oder grauem technischen Gummi und aus sehr weichem schwarzen Patentgummi, der bei niedrigen Temperaturen hergestellt wird, ausgeführt. Diese Schläuche wichen den Druckschwankungen durch Änderungen des Querschnitts aus, wie es in der Theorie für Schwingungen dünner Schalen beschrieben ist; danach unterscheidet man Dehnungsschwingungen und praktisch dehnungslose Biegungsschwingungen der Wand[14]). Die Wandteilchen führen dabei Radial- und Tangentialschwingungen aus. Die Schwingungsbäuche der Radialbewegung liegen an den Knotenstellen für die Tangentialkomponente und umgekehrt. Die Grundformen sind aus Abb. 7 ersichtlich.



Dehnung Biegung

Abb. 7. Grundschwingungen zylindrischer Schalen

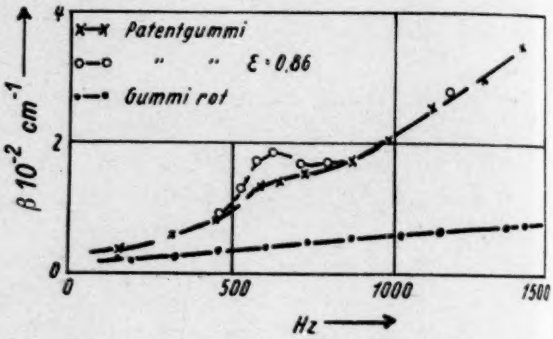



Abb. 8. Schalldämpfung in zwei Gummischläuchen ca. $6 \times 1{,}5$ mm

Zunächst sollen zwei Schläuche miteinander verglichen werden, die beide ungefähr 6 mm weit und 1,5 mm dick waren. (Die Abmessungen werden im folgenden kurz mit z. B. $6 \cdot 1{,}5$ angegeben.) Der eine bestand aus rotem Gummi, dämpfte nur etwas mehr als Metallrohr und wird darum oft als Hörschlauch benutzt, der andere, ein schwarzer Patentgummi, ließ den Schall etwas durch, seine Dämpfung war entsprechend größer und der Verlauf zeigte zwischen 500 und 800 Hz ein deutliches Maximum, möglicherweise eine Resonanz (Abb. 8). Wenn es sich um eine Biegung handelte, so mußte sie stärker angeregt werden, wenn der Querschnitt nicht kreisförmig, sondern elliptisch war. Durch straffes Rollen auf eine Walze wurde das erreicht, und die Dämpfung stieg wie erwartet. Die Elliptizität soll in bekannter Weise durch das Verhältnis der kleinen zur großen Achse

[14]) A. E. H. Love und A. Timpe, Lehrbuch der Elastizität.

ausgedrückt werden. $\varepsilon = \frac{b}{a}$ betrug zunächst 0,98, d. h. der Querschnitt hatte praktisch Kreisform; nachher 0,86.

Deutlicher war die Biegeresonanz bei einem 11 mm weiten roten Schlauch mit 2 mm Wandstärke erkennbar (Abb. 9). Er leitete den Schall bei 285 Hz besonders schlecht fort, ließ ihn dagegen gut durch die Wand treten. Beides war mit bloßem Ohr wahrnehmbar. Auch hier stieg die Resonanzspitze erheblich, wenn der Querschnitt elliptischer war. Über den Schlauch wurde ein Metallrohr gezogen. Die Wand konnte jetzt nicht mehr schwingen, die Dämpfung verlief vollkommen gleichmäßig in niedrigen Grenzen. Von der statischen Vorspannung des

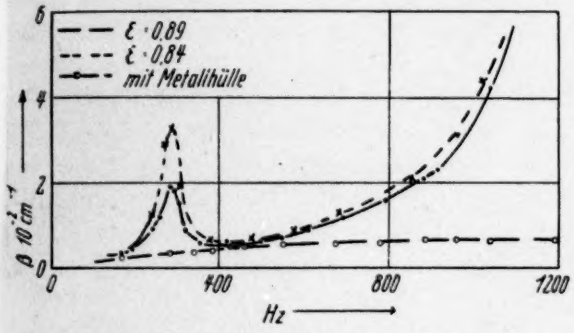



Abb. 9. Schalldämpfung in einem roten Gummischlauch 11 × 2 mm

Schlauches war die Dämpfung weitgehend unabhängig.

Die Biegungsschwingung konnte experimentell dadurch nachgewiesen werden, daß ein Stück des Schlauches senkrecht aufgehängt und an ein Telephon geschlossen wurde; es endete mit einem harten Abschluß. Die Wand wurde mit sehr feuchtem Sand angestrichen. Bei Betönung mit der Resonanzfrequenz wanderten die Sandkörner zu 4 zueinander senkrechten Falllinien parallel zur Achse und glitten dort herunter, d. h. sie wanderten zu den Knotenlinien der Tangentialbewegung und konnten dort nicht haften, weil die Normalbewegung an dieser Stelle ihre größte Amplitude besaß.

Der starke Anstieg oberhalb 800 Hz erwies sich als eine Resonanz der Dehnungsschwingung, als die Messung von 150 bis 2300 Hz ausgedehnt wurde. Gleichzeitig wurde ein schwarzer Patentgummischlauch ungefähr gleichen Ausmaßes und ein grauer Gummi 17 · 2 mm untersucht (Abb. 10). Im Verlaufe der Messung zeigte sich auch hier die bei Ultraphan erwähnte Erschei-

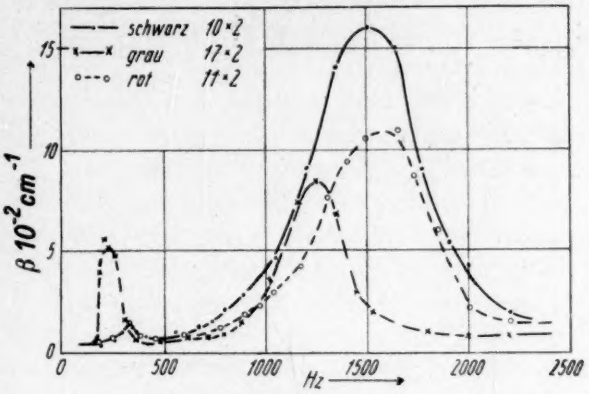



Abb. 10. Schalldämpfung in drei verschiedenen Gummischläuchen

nung, daß die Resonanzstellen sich allmählich zu höheren Frequenzen verschieben, weil die Steife durch trockneres Material wächst. Alle drei Schläuche wiesen eine kleinere Resonanz bei 2—300 Hz und eine sehr ausgeprägte zwischen 1200 und 1500 Hz auf. Die Dämpfung stieg dabei bis 0,16 $cm^{-1}$ an. Der Schall war hier außen sehr gut hörbar. Die verhältnismäßig starke untere Resonanz des grauen Schlauches lag daran, daß sein Querschnitt außerordentlich von der Kreisform abwich mit $\varepsilon = 0{,}62$. Hierdurch erklären sich auch einige noch zu besprechende

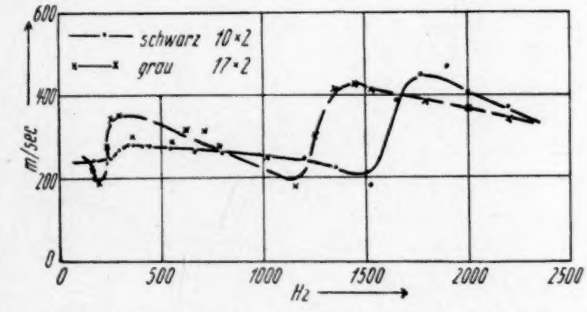



Abb. 11. Schallgeschwindigkeit in zwei Gummischläuchen

Unregelmäßigkeiten. Bei sämtlichen Schläuchen zeigte sich die Dämpfung weitgehend unabhängig von der Schallintensität. Die Wände waren ziemlich gleichmäßig, dadurch blieben die Dämpfungswerte innerhalb 15% gesichert.

Nachdem bei den verschiedenen Schläuchen eindeutig Resonanzen festgestellt waren, stand zu erwarten, daß die Schallgeschwindigkeit eine anomale Dispersion zeigt. Die Lage der Druckknoten und -bäuche war mit einem Schlauch direkt abhörbar außer in der Umgebung der Resonanzstellen, wo die Lautstärke gleichmäßig mit der Entfernung von der Schallquelle abnahm und die Wand demnach im ganzen schwingen mußte; die Wellenlänge konnte darum an diesen Stellen nur nach Gleichung (1) berechnet werden. Soweit Beobachtungen möglich waren, stimmten sie mit der Rechnung gut überein. Im kritischen Gebiet bestand zwar eine gewisse Unsicherheit über die Anzahl der Wellenlängen im Schlauch, doch konnte die erwartete Dispersion einwandfrei festgestellt werden; sie ist für den schwarzen und grauen Schlauch $11 \cdot 2$ bzw. $17 \cdot 2$ in Abb. 11 angegeben.

Eine Berechnung der Schalldämpfung in elastischen Schläuchen dürfte kaum in Frage kommen. Hierzu müssen nämlich in die KIRCHHOFFschen Differentialgleichungen für die Radial- und Tangentialkomponente der Schallschnelle die sehr umfangreichen Randbedingungen eingesetzt werden, die sich aus der Schwingungsgleichung der Wand ergeben; dabei kommt noch hinzu, daß die Größe der wirksamen Elastizität und der Reibung in der Wand sehr unsicher ist. Es gelingt aber, nach den bekannten Formeln die Eigenfrequenzen für die Biegungs- und Dehnungsschwingung zu errechnen. Sie lauten[15]:

Für die Biegung:

$$V = \frac{1}{2\pi} \frac{s(s^2-1)}{\sqrt{1+s^2}} \frac{d}{2r^2} \sqrt{\frac{E}{3\varrho'(1-\mu^2)}}.$$

Für die Dehnung:

$$V = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{1+s^2}}{r} \sqrt{\frac{E}{\varrho'(1-\mu^2)}}; \quad r = r + \frac{d}{2}.$$

Die einzelnen Größen bedeuten: $\mu$ die POISSONsche Konstante, $E$ der Elastizitätsmodul der Wand, $\varrho'$ ihre Dichte, $d$ die Wandstärke, $r$ der innere Radius. $s$ gibt die Ordnungszahl der Schwingungen. Die folgende Tab. 9 gibt die Daten von sämtlichen Gummischläuchen an, die aus mehreren Messungen gemittelt wurden. Ein Vergleich von beobachteten mit errechneten Eigenfrequenzen zeigt, daß bei der Biegung eine leidliche Übereinstimmung zu erzielen ist, wenn nicht der statische Elastizitätsmodul, sondern ein höherer, sog. dynamischer Wert benutzt wird (hier: $1{,}6 \cdot E_{\text{statisch}}$), wie ihn COSTA-

[15]) LOVE-TIMPE, a. a. O.

Tabelle 9

Daten der gemessenen Gummischläuche

| Farbe | rot | schwarz | rot | schwarz | grau |
|---|---|---|---|---|---|
| Lichte Weite × Wandstärke (ca.) | 6 × 1,5 | 6 × 1,5 | 11 × 2 | 10 × 2 | 17 × 2 |
| Hauptachsen des Querschnitts $a$ [mm] | 6,3 | 5,6 | 10 | 9,5 | 13,2 |
| Hauptachsen des Querschnitts $b$ [mm] | 6,3 | 5,8 | 11,7 | 10,3 | 21,4 |
| Exzentrizität $\varepsilon = \frac{a}{b}$ | 1 | 0,98 | 0,89 | 0,93 | 0,62 |
| Wandstärke $d$ [mm] | 1,6 | 1,5 | 2,1 | 1,9 | 2,3 |
| Dichte $\varrho'$ [g cm$^{-3}$] | 1,5 | 0,95 | 1,01 | 0,95 | 1 |
| Elastizitätsmodul (statisch) $E$ [g mm$^{-2}$] | 420 | 75 | 110 | 72 | 100 |
| Eigenfrequenzen | | | | | |
| I. Biegeschwingung: | | | | | |
| 1. experimentell | | 550—625 | 310—340 | 300—325 | 200—220 |
| 2. theoretisch mit: $1 \cdot E_{st} = E_{\text{statisch}}$ | | 464 | 273 | 214 | 103 |
| $1{,}6 \cdot E = E_{\text{dynamisch}}$ | | 580 | 345 | 271 | 131 |
| II. Dehnungsschwingung | | | | | |
| 1. experimentell | | | 1550—1600 | 1500—1550 | 1225—1275 |
| 2. theoretisch mit: $1 \cdot E_{st} = E_{\text{statisch}}$ | | | 1010 | 860 | 547 |
| $1{,}6 \cdot E_{st} = E_{\text{dynamisch}}$ | | | 1280 | 1085 | 696 |
| $\sqrt{2} \cdot 1{,}6 \cdot E_{st} = \sqrt{2} \cdot E_{\text{dynamisch}}$ | | | 1810 | 1530 | 980 |

DONI[16]) für verschiedene Versuchsbedingungen angibt. Der graue Schlauch 17 · 2 zeigt bei 210 Hz vielleicht eine Oberschwingung, denn am Telephon bewegte sich die Wand auch schon bei 128 Hz sehr stark. Bei der Dehnungsschwingung ist nur eine gute Übereinstimmung möglich, wenn entweder der Elastizitätsmodul noch einmal mit 1,5 multipliziert oder die erste Oberschwingung angenommen wird; der nicht vollkommen kreisförmige Querschnitt berechtigt vielleicht hierzu. Die Querkontraktion wurde mit 0,5 angenommen, mit 0,3 ergeben sich 8% kleinere Werte.

Die Schallgeschwindigkeit ist unter der vereinfachenden und selten zutreffenden Annahme, daß die Wand nur reine Pulsationen, d. h. die Grundform der Dehnung ausführt, von KORTEWEG[17]) und HENRY[18]) berechnet worden. Die hier vorkommenden Fälle bieten einer Rechnung dieselbe Schwierigkeit wie bei der Dämpfung.

### *Zusammenfassung*

Nach einer Methode von WAETZMANN und KEIBS werden Dämpfungsmessungen in einer größeren Anzahl von Rohren und Schläuchen unter den verschiedensten Bedingungen ausgeführt. Wegen Einzelheiten in Methode und Anordnung wird auf frühere Arbeiten verwiesen. Die Messungen an starren Rohren bestätigen die bisherigen Erfahrungen über die Gültigkeit der KIRCHHOFFschen Theorie. Rauhe Rohre erhöhen hier die Dämpfung um den doppelten bis dreifachen Betrag. Diese Beobachtung steht im Gegensatz zu einer Bemerkung von TISCHNER. Bei elastischen Rohren ist vorwiegend die Wandbewegung maßgebend. Mehrere Gummischläuche zeigen ausgeprägte Resonanzstellen. Diese werden auf dehnungslose Biegungen und auf Dehnungsschwingungen zurückgeführt und zum Teil als solche identifiziert. Die Biegeschwingung wird bei elliptischem Querschnitt stärker; kann die Wand nicht schwingen, so bleibt die Dämpfung klein. Die Resonanzfrequenzen werden nach vorhandenen Gleichungen berechnet und der Unterschied zu den tatsächlich gemessenen diskutiert. Die Schallgeschwindigkeit liegt bei Rohren nur wenig unter der im freien Raum; bei elastischen Schläuchen zeigt sie an den Resonanzstellen eine anomale Dispersion.

*(Eingegangen am 15. August 1938.)*

[16]) C. COSTADONI, Z. techn. Physik (1936), S. 108.
[17]) D. J. KORTEWEG, Ann. Physik 241 (1878).
[18]) P. S. H. HENRY, a. a. O.

# Theoretische Bemerkungen zur Schalldämpfungsmessung an Rohren und Schläuchen

Von W. Wenke

*(Mit 3 Textabbildungen)*

Mitteilungen aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule zu Breslau

In der vorangehenden Arbeit von WAETZMANN und WENKE wurden z. T. Rohre mit kleinen Inhomogenitäten sowie Schläuche gemessen, die mit zwei Metallstutzen befestigt waren. Die dort angegebene Meßmethode gibt Anlaß zu der Frage, wie sich bei einem Rohr, das aus verschiedenen Teilen besteht, der Schalldruck $p_a$ am Rohranfang und am Ende $p_e$ zueinander verhalten. Die folgende Untersuchung wird hierauf Antwort geben; dabei ist angenommen, daß das Rohr auf beiden Seiten hart abgeschlossen ist. Am Anfang ist noch ein Thermophon *Th* als Schallquelle eingeschaltet.

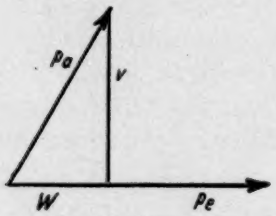



Abb. 1. Vektordiagramm für Anfangs- und Enddruck in einem Rohr

Vorher soll abgeschätzt werden, wie weit in der erwähnten Arbeit die Bedingung des rechten Winkels zwischen $p_a$ und $p_e$ erfüllt werden muß, damit man die gewünschte einfache Beziehung zwischen dem Schalldruckverhältnis und der Dämpfung erhält.

Die bekannte Ausgangsgleichung lautet:

$$(1)\qquad \frac{p_a}{p_e} = \mathfrak{Cof}\,\gamma l = \mathfrak{Cof}\,\beta l \cos\alpha l + i\,\mathfrak{Sin}\,\beta l \sin\alpha l = w + iv.$$

Dabei bedeuten $p_a$ und $p_e$ Schalldruck am Rohranfang und -ende; $\gamma = \beta + i\,\alpha$ die Fortpflanzungskonstante; $\beta$ die Dämpfung; $\alpha$ die Kreiswellenzahl und $l$ die Rohrlänge; der Sinn von $w$ und $v$ ist aus Abb. 1 ersichtlich. Real- und Imaginärteil der Gleichung müssen für sich übereinstimmen, eine einfache Umrechnung ergibt die zur Abschätzung des möglichen Fehlers brauchbare Näherungsform:

$$\mathfrak{Sin}\,\beta l = \frac{p_a}{p_e}\left[1 - \frac{1}{2}\,\frac{w^2}{p_a^2\left(1 + \frac{p_a^2}{p_e^2}\right)}\right];\quad \text{wenn } \begin{matrix} w \ll p_a \\ w \ll p_e \end{matrix}.$$

Es ist aber oft notwendig, den rechten Winkel möglichst genau einzustellen, wenn man auch über die Schallgeschwindigkeit bzw. über $\alpha$ etwas aussagen will.

Zur Lösung der gestellten Aufgabe sei ein Rohr angenommen, dessen Zusammensetzung aus Abb. 2 ersichtlich ist. Zu den beiden Teilen mit der Länge $l$ und $h$ möge die Fortpflanzungskonstante $\bar\gamma$; die Dämpfung $\bar\beta$; die Kreiswellenzahl $\bar\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}$ und der Wellenwiderstand $z_0$ gehören, zum Zwischenstück die entsprechenden Größen $\gamma, \beta, \alpha, z$ und $L$. Der Wellenwiderstand $z_0$ beträgt für Metallrohre annähernd $c \cdot \varrho_0$ ($c$ = Schallgeschwindigkeit, $\varrho_0$ = Dichte in Luft). Im allgemeinen ist $z$ komplex und von der Frequenz abhängig. Schalldruck $p$ und Schallschnelle $u$ am Anfang und Ende sind

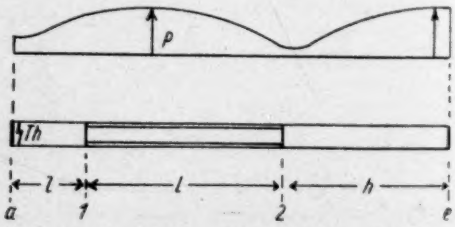



Abb. 2. Dreiteiliges Rohr mit ungefährem Schalldruckverlauf

durch die bekannten Telegraphengleichungen miteinander verknüpft:

$$(2)\qquad \begin{aligned} p_a &= p_e\,\mathfrak{Cof}\,\gamma l + u_e z\,\mathfrak{Sin}\,\gamma l \\ u_a &= u_e\,\mathfrak{Cof}\,\gamma l + \frac{p_e}{z}\,\mathfrak{Sin}\,\gamma l. \end{aligned}$$

Wendet man diese Gleichungen für jedes Rohrstück einzeln an, wobei $u_e$ wegen des harten Abschlusses hier verschwindet und faßt die erforderlichen fünf Beziehungen unter Verwen-

dung der Additionstheoreme zusammen, so erhält man für den angegebenen Fall die allgemeingültige Beziehung:

$$\frac{p_a}{p_e} = \mathfrak{Cof}\,[\gamma L + \bar{\gamma}\,(l+h)] + \frac{z-z_0}{2\,z\,z_0}\,\mathfrak{Sin}\,\gamma L\,[(z-z_0)\,\mathfrak{Sin}\,\bar{\gamma}\,(h+l) + (z+z_0)\,\mathfrak{Sin}\,\bar{\gamma}\,(h-l)]\,. \tag{3}$$

Für $z = z_0$ verschwinden die Zusatzglieder; Gleichung (1) ist wieder hergestellt.

Für $z \neq z_0$ ergibt sich nur die gewünschte Grundform, wenn $h = l = \frac{\lambda}{4}$ oder $\simeq 0$ und $\beta\,(l+h) \ll 1$ ist, d. h. die Gesamtdämpfung der Randstücke muß vernachlässigt werden können.

Weichen die Widerstände nur wenig voneinander ab, so wird Gleichung (3) wesentlich übersichtlicher mit den Annahmen:

$$z = z_0\,(1 + i\,\varepsilon);\ \ \varepsilon \ll 1;\ \ \bar{\beta}\,(h-l) \ll 1\,.$$

Diese Annäherungen genügen, um das grundsätzliche Ergebnis zu zeigen, ohne daß die Rechnung allzu umständlich wird. Stehen die Schalldrucke $p_a$ und $p_e$ aufeinander senkrecht, so muß der Realteil von Gleichung (3) verschwinden und es ergibt sich in erster Näherung für das Druckverhältnis die Beziehung:

$$\left|\frac{p_a}{p_e}\right| = \mathfrak{Sin}\,[\beta L + \bar{\beta}\,(l+h)] - \varepsilon \sin\alpha\, L \cdot \mathfrak{Cof}\,\beta L \cdot \sin\bar{\alpha}\,(h-l)$$

$\left|\frac{p_a}{p_e}\right|$ ändert sich also sinus-förmig mit $(h-l)$.

Zur physikalischen Erklärung der Gleichung sei Abb. 2 betrachtet. Dort möge ein Gummischlauch von der Länge $L$ von zwei Messingrohren $l$ und $h$ begrenzt sein. Liegt ein Druckbauch in dem Gummi, so kann dieser stark schwingen, viel Energie aufnehmen und die Gesamtdämpfung wesentlich erhöhen. Befindet sich aber an seiner Stelle ein Druckminimum, so ist sein Einfluß entsprechend klein. Bei der benutzten Frequenz betrug die Phasengeschwindigkeit im Gummi nur 270 m/s. Der Gummi beeinflußt demnach das Winkelmaß zwischen Anfangs- und Enddruck in demselben Sinn wie das Dämpfungsmaß, d. h. in geringem Umfang muß die erforderliche Gesamtlänge von der Differenz $(h-l)$ abhängen, damit $p_a$ auf $p_e$ senkrecht bleibt.

Zur experimentellen Untersuchung dieser Tatsachen wurde ein roter Gummischlauch zwischen zwei Messingrohre gespannt. Seine lichte Weite betrug 11 mm, seine Wandstärke 2 mm. (Seine näheren Daten sind in der vorangehenden Arbeit von Waetzmann und Wenke angegeben.) Die Länge der begrenzenden Rohre konnte beliebig geändert werden, indem passend gewählte Stücke zusammengeschraubt wurden, ohne daß der Schlauch mechanisch irgendwie geändert oder beansprucht wurde. Der Gummi wanderte gewissermaßen durch ein unterbrochenes Metallrohr. Zur Prüfung wurden

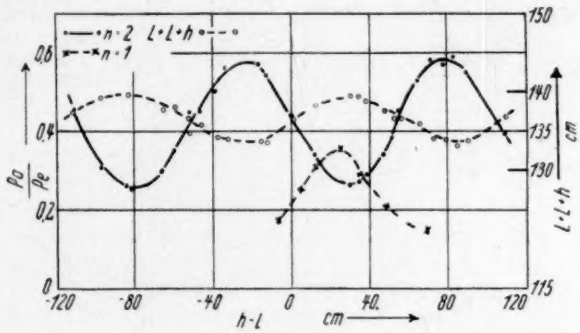



Abb. 3. $\frac{p_a}{p_e}$ und $l+L+h$ in Abhängigkeit von $h-l$

zwei Versuchsreihen aufgenommen; die zweite enthält auch die Änderung der Gesamtlänge mit der Differenz $(h-l)$. Dabei waren folgende Daten gewählt worden:

1. $n = 1$; $L = 3{,}71$ cm; $\nu = 280$ Hz;
2. $n = 2$; $L = 16{,}5$ cm; $\nu = 300$ Hz

($n$ = Anzahl der halben Wellenlängen im Gesamtrohr; $\nu$ = Frequenz).

Die beträchtliche Änderung des Druckverhältnisses in Abb. 3 bestätigt die Gleichung (4). Außerdem erkennt man die erwartete geringe Änderung der Gesamtlänge. Am Nullpunkt $(h-l=0)$, fällt $\frac{p_a}{p_e}$ mit $(h-l)$, wenn $n$ gerade ist und steigt bei ungeradem $n$. Eine im Prinzip ähnliche Messung führte Tischner aus [1]).

Für die Waetzmann-Keibssche Methode zur Dämpfungsmessung ergibt sich folgendes: soll

[1]) H. Tischner, Elektr. Nachr.-Techn. 7 (1930), S. 243.

die Dämpfung eines Schlauches bei einer ganz bestimmten Frequenz gemessen werden, so muß für den rechten Winkel zwischen $p_a$ und $p_e$ die Länge des Schlauches geändert werden, d. h. dieser muß in verschieden langen Stücken zur Verfügung stehen. Eine Unsicherheit entsteht auch hier durch ungleichmäßiges Material. Die Ansatzstücke müssen einander gleich und entweder möglichst kurz oder gleich $\frac{\lambda}{4}$ sein.

Die Gleichung (4) zeigt aber auch, wie man bei einem leicht inhomogenen Rohr aus der bekannten Druckmessung an stehenden Wellen die Dämpfung berechnen kann, die eine durchlaufende Schallwelle im Mittel erfahren würde. Man bestimmt nämlich das Verhältnis $\frac{p_{a_1}}{p_{e_1}}$ mit einem Thermophon am einen Rohrende und $\frac{p_{a_2}}{p_{e_2}}$ mit einem zweiten Thermophon am anderen Rohrende. Es ergeben sich dann die Korrekturglieder einmal mit dem Faktor $(h-l)$ und das andere Mal mit $(l-h)$. Das arithmetische Mittel aus den beiden Druckverhältnissen läßt sie verschwinden und liefert den gewünschten Durchschnittswert.

### *Zusammenfassung*

In den vorliegenden Ausführungen wird untersucht, unter welchen Bedingungen mit einer Methode von WAETZMANN und KEIBS die Schalldämpfung in Schläuchen und inhomogenen Rohren gemessen werden kann. Bei dem genannten Verfahren brauchen die Schalldrucke nicht genau senkrecht aufeinander zu stehen; ihr Verhältnis hängt bei zusammengesetzten Rohren stark von der Länge der einzelnen Teile ab; auch die Gesamtlänge schwankt etwas, wenn der Winkel zwischen den beiden Druckvektoren konstant bleiben soll (hier 90°).

Zum Schluß sei Herrn Dozent Dr. SCHUSTER für einige wertvolle Anregungen ergebenst gedankt.

*(Eingegangen am 15. August 1938.)*

# Absoluteichung von Mikrophonen

Von W. Ernsthausen

Mitteilung aus dem Telefunken-Laboratorium

*(Mit 13 Textabbildungen)*

## A. Einleitung

Die Anwendung verschiedener Eichmethoden auf das gleiche Mikrophon führt, wie die Ergebnisse einiger Laboratorien immer wieder zeigen, auf bemerkenswerte Unterschiede.

Es wurde deshalb der Versuch unternommen, den meßtechnischen Aufwand zu ermitteln, welcher notwendig ist, um mit einigen bekannten Methoden an einem Mikrophon eine befriedigende Übereinstimmung zu erzielen. Für einen leicht zu übersehenden Fall sollen die Meßergebnisse mit der Berechnung verglichen werden.

Unter dem Übertragungsmaß eines Mikrophons versteht man die Angabe der durch einen Wechseldruck von 1 $\mu$b bestimmter Frequenz am Ausgang erzeugten EMK. Bei Relaisempfängern ist dazu die Angabe der ausgesteuerten Ruhegröße nötig.

Bei niederohmigen Mikrophonen genügt die Messung der Ausgangsklemmenspannung mit einem hochohmigen Meßgerät oder über einen Verstärker. Dies ist bei Generatoren mit hohem inneren Widerstand nicht mehr zulässig. So entsteht z. B. bei Kondensatormikrophonen durch die Belastung mit der dynamischen Gitterkapazität des ersten Verstärkerrohres ein beträchtlicher Spannungsabfall, so daß die EMK selbst bestimmt werden muß. Man kann sie leicht durch eine Ersatzmessung ermitteln, indem man bei unveränderten Belastungsverhältnissen in den Mikrophonkreis diejenige Spannung gleicher Frequenz einfügt, welche am Verstärkerausgangsinstrument den gleichen Ausschlag wie die primäre Erregung hervorruft. Der Widerstand der Ersatzquelle muß dabei klein gegen den Kreiswiderstand sein.

Da durch eine periodische Erregung die Mikrophonmembran zum Sekundärstrahler wird, müßte bei strenger Betrachtungsweise auch der Einfluß des Eichraumes mit seinen für die Membranbelastung charakteristischen Eigenschaften berücksichtigt werden. Die dadurch bedingten Fehler sind jedoch bei großen Wellenlängen bezogen auf den Membrandurchmesser vernachlässigbar klein.

Die Vergleichseichungen wurden an einem Telefunken-Kondensatormikrophon (nach GERLACH)

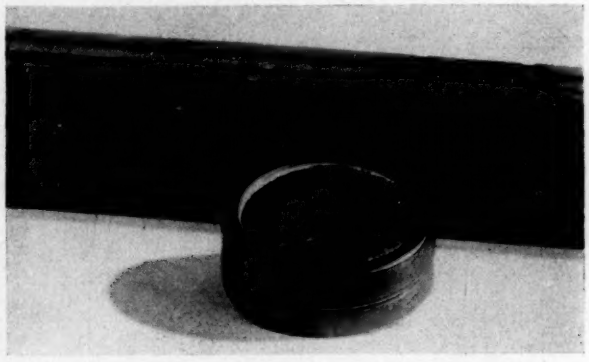


Abb. 1. Telefunken-Kondensatormikrophon nach GERLACH

durchgeführt (Abb. 1), dessen elektrostatisch gemessener Frequenzgang in Abb. 13 gestrichelt dargestellt ist. Die Konstanz und Temperaturabhängigkeit wurde laufend besonderen Kontrollen unterworfen. Außerdem bestand späterhin die Möglichkeit, das Mikrophon innerhalb weniger Minuten nach mehreren Methoden zu eichen, wodurch auch diese Fehlerquellen weitgehend ausgeschaltet waren. Als ebenso wichtig hat es sich erwiesen, bei allen Messungen das Mikrophon in der gleichen Halterung zu betreiben, um wechselnde mechanische Verspannungen zu vermeiden.

## B. Eichung mit der Rayleighschen Scheibe

Die Königsche Theorie[1]) liefert den Effektivwert der Teilchengeschwindigkeit

$$(1) \qquad u_{eff} = \frac{5{,}44}{T}\sqrt{\frac{\Theta}{\varrho R^3 \sin 2\vartheta}}\cdot\sqrt{\bar{\alpha}},$$

worin

- $T$ die Zeitkonstante des ungedämpften Systems,
- $\Theta$ das gesamte Trägheitsmoment (Scheibe + Spiegel),
- $R$ den Scheibenradius,
- $\varrho$ die Luftdichte,
- $\vartheta$ den Winkel zwischen Scheibe und der Normalen zur Strömungsrichtung,
- $\bar{\alpha}$ den Winkelausschlag der Scheibe im Bogenmaß

bedeuten.

Für die verwendete, an einem feinen Quarzfaden aufgehängte Scheibe ergab sich nach sorgfältiger Bestimmung ihrer Konstanten, wobei die Zeitkonstante im Vakuum gemessen wurde,

$$(2) \qquad u_{eff} = 1{,}062\sqrt{\bar{\alpha}}\ \text{cm/sec}$$
$$p_{eff} = 44{,}2\sqrt{\bar{\alpha}}\ \mu\text{b}.$$

Da die Königsche Rechnung nur unter bestimmten Einschränkungen, nämlich für eine reibungsfreie und inkompressible Flüssigkeit gilt, welche gleichförmig ein abgeplattetes Ellipsoid verschwindender Dicke umströmt, wurde ihre Genauigkeit für den Fall, daß $\lambda \gg R$ ist, experimentell geprüft.

Zuerst wurde der Ausschlag der Scheibe im Geschwindigkeitsbauch eines bei 280 Hz durch einen Lautsprecher in Resonanz erregten Rohres mit der Auslenkung einer 0,5 $\mu$ dünnen, 30 mm langen und 2 mm breiten Aluminiumfahne verglichen. Die mikroskopisch gemessene Amplitude ergab gegenüber der Scheibe einen um 30% kleineren Wert, was auf ihre endliche Masse zurückgeführt werden kann. Die so in Abhängigkeit vom Lautsprecherstrom $I_L$ bestimmte Bewegungsamplitude $a$ erfüllt den zu fordernden linearen Zusammenhang (Abb. 2).

[1]) W. König, Wied. Ann. 43 (1881), S. 43.

Da für Eichzwecke eine derartige Abweichung nicht tragbar erschien, wurde die Rayleigh-Scheibe im Gleichluftstrom unter Hinzufügen einer sehr kleinen, durch die translatorische Verschiebung bedingten Korrektur geeicht. Die Scheibe befand sich in der Mitte eines 2 m langen Rohres, dessen innerer Durchmesser von 9,5 cm genügend groß im Hinblick auf eine Beeinflussung des Strömungsfeldes um die Scheibe selbst war. Eine im Inneren des Rohres aufgestellte Lampe, deren Wendel optisch auf den kleinen Scheibenspiegel abgebildet wurde, erzeugte selbst bei ganz schwacher Heizung eine störende Zirkulationsströmung, so daß sie außen

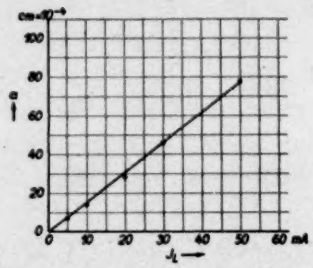



Abb. 2. Bewegungsamplitude der Aluminiumfahne als Funktion des Lautsprecherstromes

angebracht werden mußte. Der durch ein Fenster in das Rohr gelangende Lichtstrahl wurde durch ein kleines in der Rohrachse befindliches Prisma rechtwinklig umgelenkt und fiel, vom Scheibenspiegel reflektiert, durch ein zweites Fenster auf eine im Außenraum ablesbare Skala. Dem Rohr wurde aus einer Preßluftflasche über einen geeichten Gasmesser ein durch ein Reduzierventil regelbarer Gleichluftstrom zugeführt.

Zur Beruhigung der Strömung dienten sowohl am Eingang als auch am Ausgang Filter, welche aus mehreren Filz- und Wattelagen bestanden. Es soll hier erwähnt werden, daß Geschwindigkeitsschwankungen, wie sie durch Rückwirkung einer nicht völlig gleichförmig umlaufenden Gasuhr entstehen, durch derartige Filter nicht unterdrückt werden können und daher die Messung unmöglich machen.

Aus der mit einer Stoppuhr bestimmbaren, in der Zeiteinheit durch das Rohr tretenden Luftmenge läßt sich die Geschwindigkeit am Ort der Scheibe ermitteln, wenn ihre Verteilung über den Rohrquerschnitt bekannt ist. Die zu-

grunde gelegte theoretische Verteilung für laminare Strömung, also für REYNOLDSsche Zahlen < 2000 ergab eine 40%ige Abweichung gegenüber der KÖNIGschen Theorie.

Deshalb wurde die Geschwindigkeit der Luftströmung am Ort der RAYLEIGHschen Scheibe direkt gemessen. Abb. 3 zeigt die Meßeinrichtung. Die Scheibe ist durch eine Meßstrecke bekannter Länge aus dünnem Draht ersetzt. Dieser wird durch einen feinen Lichtstrahl über das Prisma von außen her beleuchtet. Dem Gleichluftstrom werden zu jeder Messung makroskopische Schwebeteilchen aus polymerisiertem Azetaldehyd zugesetzt, welches aus der Gasphase auskristallisiert wurde. Sie sind außerordentlich leicht und haben nur eine sehr geringe Sinkgeschwindigkeit. Als Ausgangskörper diente der im Handel befindliche Meta-Brennstoff[2]), welcher in einem am Eingang des Meßrohres angebrachten Glasrohr durch ein Heizwendel erhitzt wurde. Durch einen Druck auf den Gummiball gelangt eine genügende Menge dieser schneeflockenähnlichen Teilchen in den Meßraum, wo sie vom Luftstrom erfaßt

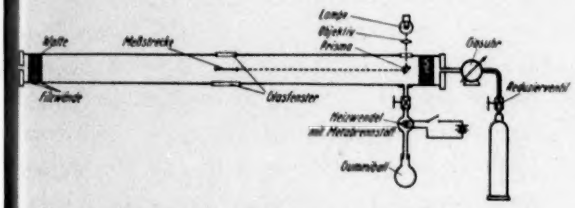



Abb. 3. Eicheinrichtung der Gasuhr

werden und hell beleuchtet die Meßstrecke passieren. Diese Zeit wird zugleich mit dem durchgedrückten Luftvolumen mittels einer Stoppuhr bestimmt und damit (bei bekannter Länge der Meßstrecke) die Gasuhr in Geschwindigkeitseinheiten geeicht. Die durch den Luftstoß entstehende Störung der gleichförmigen Geschwindigkeit gleicht sich bei genügender Rohrlänge wieder aus, so daß an der Stoppstelle wieder ein ungestörtes Strömungsbild vorhanden ist.

Abb. 4 zeigt die so ermittelte Eichkurve des Gasmessers und Abb. 5 den damit geeichten Ausschlag der RAYLEIGH-Scheibe (Kurve *a*) im Vergleich mit der nach der KÖNIGschen Formel aus den Konstanten berechneten Kurve *b*. Die Eichkurven stimmen so gut überein, daß sich ihre Anwendung auf die Wechselströmung unter der Bedingung $R \ll \lambda$ als gerechtfertigt erweist.

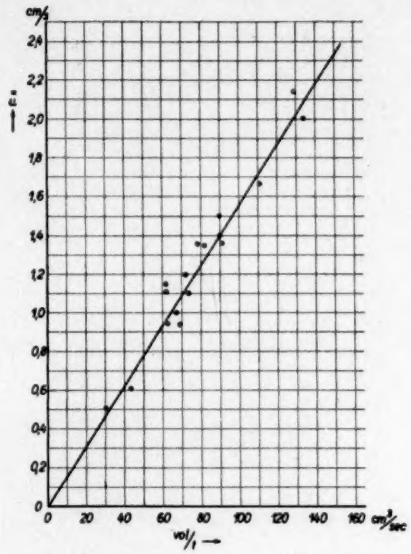



Abb. 4. Eichkurve der Gasuhr

Mit der nun endgültig bekannten RAYLEIGH-Scheibe wurde das Mikrophon in folgender Weise verglichen. Ein Rohr wurde durch einen an einem Ende befindlichen Lautsprecher in der halben Wellenlänge erregt. Die Scheibe hing in

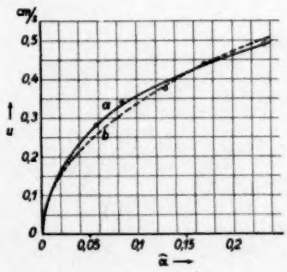



Abb. 5. Experimentell (a) u. theoretisch (b) ermittelte Eichkurve der RAYLEIGH-Scheibe

der Mitte auf der Rohrachse, also im Geschwindigkeitsbauch, das Mikrophon befand sich am anderen Rohrende, also im Druckbauch der stehenden Welle (Abb. 6). Um Störströmungen, wie sie etwa durch ein Temperaturgefälle längs des Rohres auftreten können, von der Scheibe

[2]) SCHMIESCHECK, Z. techn. Physik 17 (1936), S. 3.

fernzuhalten, wurde sie durch feine Gazezwischenwände vom übrigen Rohr getrennt. Bei erschütterungsfreier Aufstellung blieb auch während 24 Stunden der Nullpunkt mit großer Genauigkeit erhalten, so daß die Messung nicht schwieriger als eine Spiegelgalvanometermessung war.

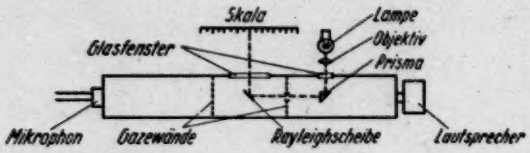



Abb. 6. Mikrophoneichung mit der RAYLEIGH-Scheibe

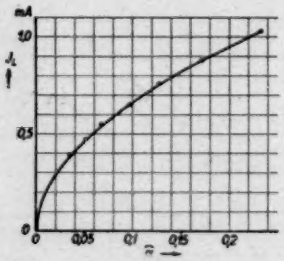



Abb. 7. Lautsprecherstrom als Funktion des Scheibenwinkels

Die Eichung wurde bei zwei verschiedenen Frequenzen, also mit zwei Rohren verschiedener Länge durchgeführt. In Abb. 7 ist der Lautsprecherstrom $I_L$ als Funktion des Scheibenausschlages dargestellt. Der Verlauf deckt sich weitgehend mit dem der Abb. 5.

Ein weiterer Vergleich wurde noch im freien Schallfeld durchgeführt.

## C. Eichung in der Druckkammer

Die einfachste und, wie sich gezeigt hat, auch die genaueste Methode ist die Eichung in der Druckkammer.

Ein von einem Motor über einen Exzenter bewegter Kolben ruft in einem abgeschlossenen Raum, in welchem sich das Mikrophon befindet Druckschwankungen hervor. Wenn das vom Kolben verdrängte Wechselvolumen $V_x$ und das Kammervolumen $V_0$ bei dem Atmosphärendruck $P_0$ bekannt sind, dann berechnet sich der Wechseldruck $p$ unter der Voraussetzung adiabatischer Kompression ($\varkappa = 1{,}41$) aus der Beziehung

$$\frac{p}{P_0} = \frac{V_x}{V_0}\varkappa, \tag{3}$$

welche ihre Gültigkeit verliert, wenn die Kammerdimensionen in die Größe der Wellenlänge kommen und bei sehr tiefen Frequenzen, wenn durch die endliche Wärmeleitfähigkeit der Wandung dem Kompressionsvorgang merkliche Energiebeträge entzogen werden. Nach Überlegungen von BALLANTINE[3]) ist aber der dadurch verursachte Fehler bei 10 Hz kleiner als 2,5%; er kann außerdem durch Auskleiden der Wandung mit isolierenden Stoffen beliebig heruntergesetzt werden.

Eine zuerst gebaute Kammer mit Volumenwerten von $V_0 = 1790$ cm³, $V_x = 0{,}048$ cm³ und einem Wechseldruck von $p = 27$ μb entsprach nicht allen Erwartungen, da wechselnder Riemenschlupf und ein geringes Spiel in der Exzenterlagerung das Auftreten von Oberwellen in der Kolbenbewegung und damit bei bestimmten Drehzahlen die Anregung der Kammer in ihren Eigenschwingungen zur Folge hatte. Außerdem waren umfangreiche Maßnahmen zur Unterdrückung des vom Motor herrührenden Körperschalles notwendig.

Mit diesen Erfahrungen entstand eine zweite Kammer mit den Volumenwerten $V_0 = 778$ cm³, $V_x = 7{,}0 \cdot 10^{-3}$ cm³; $p_{eff} = 9$ μb (Abb. 8). Der Kolben wurde hierbei durch ein elektrodyna-

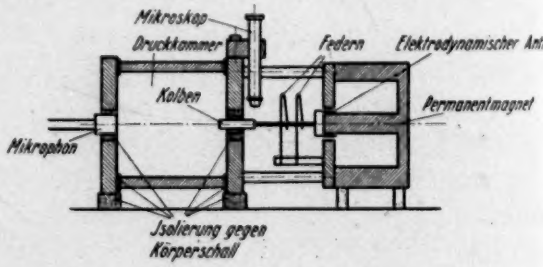



Abb. 8. Kolbendruckkammer

misches Lautsprechersystem angetrieben. Kolben- und Spulenmasse wurden zusammen mit der Führungsfeder auf eine Eichfrequenz von ~ 100 Hz abgestimmt, was einen genügend sinusförmigen Schalldruck gewährleistet. Die Eigenfrequenz dieses Systems läßt sich jedoch

[3]) BALLANTINE, J. Acous. Soc. Am. 3 (1932), S. 319

ohne Schwierigkeit auch auf 300 Hz heraufliegen. Die Amplitude wurde mikroskopisch an der Kolbenkante gemessen.

In der Druckkammer entsteht durch die Kolbenreibung eine thermisch bedingte Gleichdruckerhöhung. Der Ausgleich kann durch einen feinen Kanal von etwa 0,75 mm Durchmesser und 20 mm Länge geschaffen werden, welcher, wie sich leicht zeigen läßt, keinen wesentlichen Einfluß auf den Meßvorgang ausübt.

Von der Linearität des Zusammenhanges zwischen Druck und Volumen auch bei großen Druckwerten überzeugt man sich, indem man in die Kammer einen Körper mit bekanntem Volumen bringt und die dazugehörige Druckerhöhung beobachtet.

Die Größe des noch vom Antrieb her in den Meßraum gelangenden Störschalles läßt sich ermitteln, wenn man die in die Kammer führende Kolbenbuchse luftdicht verschließt. Da von der Kolbenbewegung keine Druckschwankungen mehr herrühren können, muß der vom Mikrophon registrierte Rest Störschall sein. Bei der benutzten Kammer war er von so geringer Größe, daß er vom Instrument nicht mehr angezeigt wurde.

Da die Vorgänge bei dieser Methode leicht zu übersehen und die Konstanten der Messung einfach und mit guter Genauigkeit zu bestimmen sind, ist der Eichung mit dieser Druckkammer die größte Zuverlässigkeit zuzuschreiben.

## D. Elektrostatische Eichung
### (nach Grützmacher und Meyer)

In bekannter Weise liegt an einer gitterförmigen, vor der Membran befindlichen Hilfselektrode über eine große Gleichspannung $U_0$ eine kleine Wechselspannung $U_1$, welche auf die Membran einen elektrostatisch bewirkten Wechseldruck

$$(4) \qquad p_{eff} = K \frac{U_0 \cdot U_{1\,eff}}{d^2} \cdot 0{,}886 \cdot 10^{-6}\ \mu\text{b}$$

ausübt, wenn $U_1 \ll U_0$ ist.

$d$ ist der Abstand zwischen Hilfselektrode und Membran. Die Konstante $K$ gibt die durch die Gitterform bewirkte Verringerung der elektrostatischen Kraft, bezogen auf eine nicht durchbrochene Elektrode, an. Sie wurde von Ballantine[4]) für eine geschlitzte Elektrode berechnet (Abb. 9).

Diese Hilfselektrode muß entweder so gebaut werden, daß keine störenden Eigenfrequenzen der durch die Schlitzung entstandenen Stäbe auftreten, oder aber es muß für eine hinreichende Dämpfung Sorge getragen werden.

Um eine zusätzliche Luftdämpfung der Membran zu vermeiden, muß die Hilfselektrode in einem Abstand von mindestens 0,1 cm angebracht werden.

Der schwächste Punkt dieser Eichmethode ist eine hinreichend genaue Bestimmung des Abstandes $d$, da ein Meßfehler quadratisch in die Eichung eingeht. $d$ wurde in der Weise mikroskopisch ermittelt, daß an einer am Mikroskop befindlichen geeichten Skala die Differenz der beiden Schärfeeinstellungen auf Hilfselektrode und Membran abgelesen wurde. Durch Bildung des Mittelwertes an verschiedenen über die Membran verteilten Punkten kann eine Genauigkeit von $\pm 4\%$ erreicht werden.

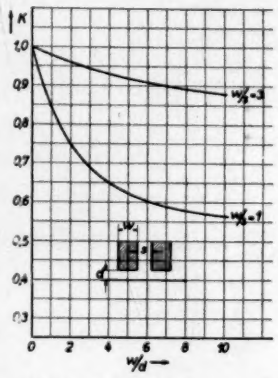


Abb. 9. Die Gitterkonstante als Funktion d. Verhältnisses von Stegbreite zu Luftspalt

Diese Schwierigkeiten lassen sich in einfacher Weise durch eine Gleichdruckeichung beseitigen unter der Voraussetzung, daß das Mikrophon gut abgedichtet ist.

## E. Elektrodynamische Eichung
### (nach Gerlach)

Mit der Mikrophonmembran selbst wird eine zweite dünne Aluminiummembran durch eine flache, nach außen gut abgedichtete Luftkammer für alle Frequenzen starr gekoppelt (Abb. 10). Die angekoppelte Membran wird als ein gleichmäßig vom Strom der Eichfrequenz durchflossenes Band ausgebildet. In dem geeichten Gleichfeld eines Toroides wirkt auf die

[4]) A. a. O.

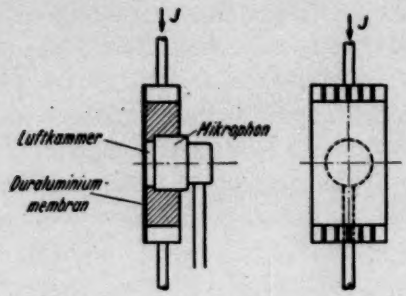



Abb. 10. Druckkammer mit elektrodynamisch erregter Membran

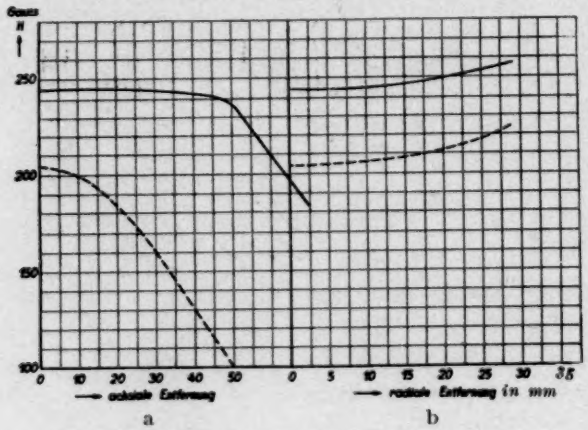



Abb. 11. Feldverlauf im Innern eines Toroides

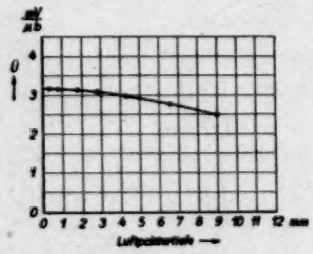



Abb. 12. Eichfehler in Abhängigkeit von der Luftpolstertiefe

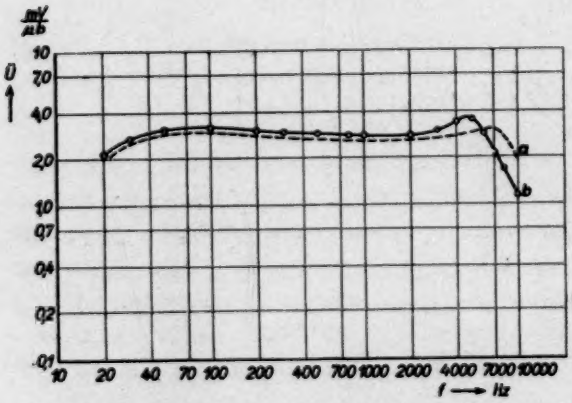



Abb. 13. Elektrostatische (a) und elektrodynamische (b) Eichung eines Mikrophons

Membran ein Wechseldruck von der Größe

$$\mathfrak{p}_{eff} = \frac{H \cdot I_{eff}}{b} \cdot 10^{-1}\ \mu\text{b}, \tag{5}$$

wenn die Bandbreite $b$ in cm, die magnetische Feldstärke $H$ in Gauß und der Wechselstrom $I_{eff}$ in A eingesetzt wird.

Das magnetische Feld des Toroides, welches ballistisch unter Verwendung eines Gegeninduktionsnormals absolut geeicht und ausgemessen wurde, muß eine räumliche Konstanz von einer mindestens den Mikrophondimensionen vergleichbaren Ausdehnung besitzen. In den Abb. 11a und b ist der Feldverlauf im Inneren einer 8 cm langen (gestrichelte Kurve) und einer 16 cm langen Spule (ausgezogene Kurve) in achsialer (Abb. 11a) und in radialer Richtung (Abb. 11b) in beiden Fällen von der Spulenmitte angefangen dargestellt.

Es hat sich erwiesen, daß die Wahl des Abstandes und der mechanischen Spannung der Hilfsmembran nicht ohne Einfluß auf die Meßgenauigkeit bleibt. Selbst bei sehr tiefen Frequenzen, deren Wellenlängen als unbedenklich groß gegen die Tiefe des Kopplungsluftpolsters angenommen werden können, ist doch, wie Abb. 12 beweist, eine Abhängigkeit des erzeugten Druckes und daher des Übertragungsmaßes $\dot{U}$ bei konstanter Membranspannung, Strom und Feld von der Luftpolstertiefe vorhanden. Sie ist darauf zurückzuführen, daß bei einer bestimmten Membranspannung die Auslenkung der Hilfsmembran nur durch die Elastizität eines sehr flachen Luftpolsters begrenzt wird. Dies führt zur Verwendung von sehr dünnen und leichten Hilfsmembranen, deren Mindestspannung aber wiederum durch die Vermeidung von Unterteilungen besonders bei hohen Frequenzen festliegt. Bei sorgfältigem Aufbau ist es jedoch möglich, zu sehr guten Ergebnissen zu gelangen.

In Abb. 13 sind zwei absolute Eichkurven dargestellt, welche schließlich mit der elektrostatischen (*a*) und mit der elektrodynamischen Methode (*b*) erhalten wurden. Die Abweichung der Resonanzfrequenzen um den Faktor 0,7 entspricht der Verdopplung der schwingenden Masse durch die Hilfsmembran.

Die Methode hat den Vorteil, daß sie, einmal mit optimalen Dimensionen aufgebaut, sehr einfach zu handhaben und zu kontrollieren ist.

## F. Ergebnisse

Die nach den beschriebenen vier Methoden unter Berücksichtigung aller im Verlaufe der Untersuchung gemachten Erfahrungen durchgeführte Eichung des Telefunken-Kondensatormikrophons für eine Vorspannung von 30 V führte zu folgenden Werten des Übertragungsmaßes.

Eichung mit der RAYLEIGH-Scheibe
im Resonanzrohr bei 100 Hz 3,17 mV/$\mu$b
im Resonanzrohr bei 300 Hz 3,25 mV/$\mu$b
im freien Feld bei 100 Hz 3,15 mV/$\mu$b

Eichung mit der Druckkammer
bei 100 Hz 3,1 mV/$\mu$b

Elektrostatische Eichung
bei 100 Hz 2,98 mV/$\mu$b

Elektrodynamische Eichung
bei 100 Hz 3,2 mV/$\mu$b

Die größte Genauigkeit kommt der Druckkammereichung zu; der größte Fehler einer Einzelmessung kann mit $\pm 4\%$ angegeben werden, während er bei den anderen Methoden nicht ohne weiteres bestimmbar ist. Am ungenauesten ist zweifellos die Feld-Eichung, deren Fehler mit $\pm 10 \div 15\%$ geschätzt werden kann. Im Hinblick auf die übliche Genauigkeit akustischer Messungen ist die Übereinstimmung jedoch befriedigend.

## G. Berechnung des Übertragungsmaßes

Der Vergleich zwischen Rechnung und Messung wurde, da das bisher verwandte Mikrophon sich wegen seines inneren Aufbaues nicht dazu eignete, an einem Mikrophon vorgenommen, dessen Luftpolstereigenschaften sich leicht bestimmen ließen und dessen Membransteife von verschwindender Größe gegen die Luftpolstersteife war.

Die folgenden Betrachtungen gelten nur für ein Gebiet weit unterhalb der Eigenfrequenz, in welchem die Membran durch das Luftpolster vorwiegend elastisch gehemmt ist und eine der statischen ähnliche, parabolische Durchbiegungslinie hat. Die für diese Durchbiegungsform auf den schwingenden Massenpunkt reduzierte Luftpolstersteife ergibt sich als Koeffizient der potentiellen Energie des Luftvolumens[5]). Sie ist

$$S = \frac{1}{4} F_m^2 \frac{P_0}{V_0} \varkappa. \tag{6}$$

Die auf die Membran wirkende Kraft ist

$$K = \frac{1}{2} F_m P. \tag{7}$$

Das Verhältnis von Membranauslenkung $d_1$ zum Ruheabstand $d_0$ bei einem Schalldruck von $P = 1\ \mu$b ergibt sich zu

$$\delta = \frac{d_1}{d_0} = \frac{2\,V_0}{\varkappa\, d_0\, P_0\, F_m}. \tag{8}$$

Das Übertragungsmaß des Mikrophons beträgt daher, wenn es in der Niederfrequenzschaltung über einen Widerstand an das erste Verstärkerrohr angekoppelt ist für den Grundton

$$\dot{U} = \frac{2\,V_0\,E_0\,R \cdot C_0\,\omega}{\varkappa\, d_0\, P_0\, F_m \sqrt{1 + (R\,\omega\,C_0)^2}} \cdot 10^3 \text{ mV}/\mu\text{b}. \tag{9}$$

Die Formelgrößen haben folgende Bedeutung und Werte für die benutzte Kapsel:

| | | |
|---|---|---|
| Ankopplungswiderstand | $R$ | $= 100 \cdot 10^6$ Ohm |
| Vorspannung | $E_0$ | $= 60$ V |
| Ruhekapazität | $C_0$ | $= 53 \cdot 10^{-12}$ F |
| Luftpolstervolumen | $V_0$ | $= 0{,}52$ cm$^3$ |
| Atmosphärendruck | $P_0$ | $\approx 10^6\ \mu$b |
| Membranfläche | $F_m$ | $= 8$ cm$^2$ |
| Verhältnis d. spez. Wärmen | $\varkappa$ | $= 1{,}41$ |
| Membranruheabstand | $d_0$ | $= 2{,}7 \cdot 10^{-3}$ cm |

Für eine Frequenz von 100 Hz ergibt die Rechnung

$$\dot{U} = 1{,}94 \text{ mV}/\mu\text{b}$$

und die Messung in der Druckkammer

$$\dot{U} = 1{,}8 \text{ mV}/\mu\text{b}.$$

H. LICHTE und E. GERLACH bin ich für viele wertvolle Hinweise zu Dank verpflichtet.

*Zusammenfassung*

Ein Kondensatormikrophon wird nach vier verschiedenen Methoden absolut geeicht. Die dabei auftretenden Schwierigkeiten und Fehler werden besprochen. Die Empfindlichkeit eines besonders geeigneten Mikrophons wird durch Rechnung und Messung vergleichsweise bestimmt.

[5]) SCHUSTER, Handbuch d. Experimentalphys., Bd. 17, 2, Kap. 1, Akademische Verlagsges., Leipzig 1934.

*(Eingegangen am 16. Juli 1938).*

# Über die Berechnung des Schallfeldes einer Luftschraube[1])

Von W. Ernsthausen und W. Willms

Mitteilung aus dem Institut für Elektrophysik der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt E. V. Berlin-Adlershof

*(Mit 13 Textabbildungen)*

Die Bedeutung, die dem Luftschraubengeräusch als der wesentlichen Quelle des Flugzeugschalles allgemein beigemessen wird, äußert sich in einer großen Zahl von experimentellen und theoretischen Arbeiten[2–7]). Diese beziehen sich fast ausschließlich auf den Drehklang, d. h. auf den harmonischen Anteil des Luftschraubengeräusches. Darüber hinaus entsteht an der Luftschraube durch Wirbelablösung am Schraubenblatt noch ein Drehgeräusch, das infolge seiner geringen Stärke und hohen Frequenz, die in der Luft stark absorbiert wird, von geringer Wichtigkeit ist.

Im folgenden soll zusammenfassend über Untersuchungen berichtet werden, die in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, Adlershof, zur Klärung dieser Probleme durchgeführt wurden. Ferner wird kurz auf zwei Arbeiten[8]) [9]) eingegangen, die in neuerer Zeit erschienen sind und sich ebenfalls mit der quantitativen Berechnung des Luftschraubenschalles befassen.

Gutin[8]) und Deming[9]) beschränken sich darauf, die Luftschraube durch einen mit Quellen unendlich dicht besetzten Kreisring zu ersetzen. Gutin berechnet die Quellenstärke aus dem Schub und Drehmoment, indem er annimmt, daß die auf das Schraubenblatt ausgeübten Kräfte ihrerseits auf das Medium zurückwirken. Die Kenntnis der physikalischen Vorgänge am Luftschraubenblatt ist dabei im einzelnen nicht notwendig.

Deming geht in seinen Berechnungen, welche nach Abschluß der vorliegenden Arbeit bekannt wurden, nur auf Schrauben mit symmetrischem, nichtangestellten Profil, d. h. auf Schrauben ohne Schub ein. Aus dem experimentellen Befund, daß der Schalldruck in großer Entfernung von der Schraube mit der vierten Potenz des Radius ansteigt, schließt er, daß für alle Schrauben ein „äquivalenter Strahlerring" existiert, dessen Radius 0,8 R und dessen Breite 0,4 R ist, was zum mindesten im Hinblick auf die Gleichsetzung von Schalldruck und Quellenstärke fraglich erscheint, weil in den Schalldruck die zunächst noch unbekannten Strahlungseigenschaften der Schraubenkreis-

[1]) Nach einen Vortrag vor der Lilienthalgesellschaft für Luftfahrtforschung. Luftwissen 5 (1938). S. 128.

[2]) Waetzmann, E. Die Entstehung und die Art des Flugzeugschalles. Z. techn. Physik 2 (1921), S. 166.

[3]) Lynam, E. J. H. und Webb, H. A., The emission of sound by airscrews. Aeron. Res. Com. Rep. a. Mem. (1919), S. 624.

[4]) Paris, E. T., A note on the sound generated by a rotating airscrew. Philos. Mag. 13 (1932), S. 99.

[5]) Kemp, C. F. P., Some properties of the sound emitted by airscrews. Prcc. phys. Soc. 44 (1932), S. 151.

[6]) Hart, M. D. The aeroplane as a source of sound. Aeron. Res. Com. Rep. a. Mem. 1310 (1929).

[7]) Obata, J., S. Morita, Y. Yosida, Investigations on the origin of the sounds emitted by revolving airscrews. Rep. aeron. Res. Inst. Tokyo (1933), S. 99 u. (1933), S. 132.

Obata, J., Y. Yosida, S. Morita. Studies on the sounds emitted by revolving airscrews. Rep. aeron. Res. Inst. Tokyo 79 (1932) und 80 (1932).

[8]) Gutin, L., Über das Schallfeld einer rotierenden Luftschraube. Physik Z. der Sowjetunion 9. (1936), S. 57.

[9]) Deming, A. F. Noise from propellers with symmetrical sections at zero blade angle. NACA Techn. Notes (1937), S. 605.

fläche eingehen. Unter Berücksichtigung des Verhältnisses von Profildicke zu -tiefe gelangt er zur absoluten Größe der Strahleramplitude.

Der Ersatz der strahlenden Fläche durch einen äquivalenten Ring ist in erster Näherung nur für den Grundton zulässig. DEMING geht daher noch einen Schritt weiter als GUTIN, dessen Überlegungen im wesentlichen nur für den Grundton gelten und berücksichtigt die höheren Harmonischen durch eine Korrekturfunktion, die aus Schalldruckanalysen an einer Modellschraube bestimmt wird.

Den Untersuchungen in der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt lag der Gedanke zugrunde, aus der physikalischen Natur der Quellen zu Erkenntnissen über Schallfeld und Strahlungsleistung einer umlaufenden Luftschraube zu gelangen.

## Form und Stärke der elementaren Störung

An einer Modellschraube wurden zunächst Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Nah- und Fernfeld einer Luftschraube durchgeführt[10]). Das Ergebnis führte zu der Vorstellung, daß das mit dem Schraubenblatt umlaufende statische Feld in der Schraubenebene periodische Störungen von der Größe und Form der zeitlichen Feldänderung erregt. Jeder von einer solchen Störung erregte Punkt kann als Ausgangspunkt einer sekundären Welle, also als Schallstrahler aufgefaßt werden. Das Schallfeld einer Luftschraube wird daher der Berechnung zugänglich gemacht, wenn man es sich von einer in der Schraubenebene liegenden und mit Strahlern unendlich dicht besetzten Kreisfläche erzeugt denkt.

Mathematisch formuliert man die Aufgabe folgendermaßen: Man legt um die Luftschraube eine geschlossene Kontrollfläche, welche aus zwei im geringen Abstand voneinander befindlichen Kreisflächen vom Radius der Luftschraube besteht und den von der Luftschraube bei ihrer Drehung bestrichenen Raum einschließt. Dann wird auf dieser Kontrollfläche in einem Flächenelement $dS$ durch die umlaufende Schraube ein bestimmter zeitlicher Verlauf des Potentials $\Phi$ und des Gradienten $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ vorgegeben. Das gesuchte Potential $\Phi_P$ im Aufpunkt $P$ findet man im allgemeinsten Fall einer Störung aus der bekannten Formel der Potentialtheorie

$$\Phi_P = -\frac{1}{4\pi}\int\int \frac{e^{i\omega\left(t-\frac{R_P}{c}\right)}}{R_P}\frac{\partial \Phi}{\partial n}\,dS + \frac{1}{4\pi}\int\int \Phi\,\frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{e^{i\omega\left(t-\frac{R_P}{c}\right)}}{R_P}\right)dS, \tag{1}$$

welche das Potential im Aufpunkt $P$ in Abhängigkeit der Verteilung von $\Phi$ und $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ auf der Oberfläche des Gebietes beschreibt. Sie gilt für die Ausbreitung von periodischen Störungen in einem zusammendrückbaren Medium, wie es die Luft darstellt, für das also die Differentialgleichung

$$\Delta\Phi + k^2\Phi = 0 \tag{2}$$

besteht.

Das statische Potentialfeld der Luftschraube bzw. eines Tragflügelprofils wird im allgemeinen für ein unzusammendrückbares Medium angegeben, welches der Differentialgleichung

$$\Delta\Phi' = 0 \tag{3}$$

genügt. Bei einer genaueren Betrachtung müßte man von dem statischen Potentialfeld der Luftschraube im zusammendrückbaren Medium ausgehen. Es ist jedoch zulässig und bedeutet nur einen Verzicht auf die Glieder höherer Ordnung, in Gebieten, die klein zur Wellenlänge sind, die Differentialgleichung (2) durch (3) zu ersetzen. Die Ersetzung ist um so genauer möglich, je kleiner das betrachtete Gebiet ist. Man rechnet also im Innern der Kontrollfläche aerodynamisch und außerhalb akustisch und erfüllt an der Grenzfläche die Bedingungen

$$\Phi = \Phi' \text{ und } \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{\partial \Phi'}{\partial n}\,. \tag{4}$$

Über den zeitlichen Verlauf der Störung in einem Flächenelement kann man aussagen, daß er sich im wesentlichen auf den Augenblick beschränkt, in dem das Profil vorbeistreicht[10]).

[10]) ERNSTHAUSEN, W., Zur Entstehung des Luftschraubengeräusches. Luftf.-Forschg. 13 (1936), S. 433.

Die Periode, mit der die Störung auftritt, ist durch das Produkt von Drehzahl und Flügelzahl gegeben. Man erhält eine erhebliche Vereinfachung, wenn man diesen Störungsverlauf durch eine Fourier-Analyse in seine harmonischen Komponenten zerlegt und als Zeitfunktion

$$(5)\qquad f(t) = k_0 + k_1 \cos \omega t + k_2 \cos 2\,\omega t + \cdots k_\nu \cos \nu\,\omega t$$

ansetzt.

Die normale Auslenkung der Luftteilchen durch das Vorbeistreichen des Profils kann man

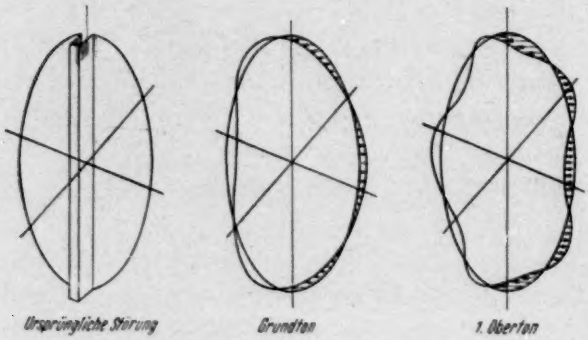



Abb. 1. Strahlerformen der zweiflügeligen Luftschraube

für beliebige Profilformen in erster Näherung durch einen Rechteckverlauf wiedergeben, der durch die Profiltiefe $t$ und die halbe Profildicke $d/2$ gekennzeichnet ist. Ein störender Fehler wird erst bei höheren Harmonischen auftreten, deren Wellenlängen vergleichbar mit der Blattiefe sind. Von Fall zu Fall kann man das Verfahren der durch die wirkliche Profilform gegebenen Störung anpassen und damit verfeinern.

Für den Rechteckverlauf erhält man

$$(6)\qquad k_0 = \frac{t}{2\pi r};\quad k_\nu = (-1)^\nu \frac{d}{\nu \pi} \sin \frac{\nu t}{2r}.$$

Um die folgende Entwicklung in einfacher Form durchführen zu können, werden die Fourier-Koeffizienten eines mittleren Radius (z. B. $r = 0{,}6$ R) als charakteristisch für die ganze Schraubenfläche angenommen, was bei kleinen Flügelzahlen sicher zulässig ist. Die Strahlerformen der zweiflügligen Luftschraube erläutert die Abb. 1.

Das angestellte Luftschraubenblatt erzeugt eine Störung, die sich aus dem verdrängten Mediumvolumen und aus dem durch die Zirkulation $\Gamma$ gegebenen Auftrieb zusammensetzt, was dem ersten bzw. dem zweiten Term der Gleichung (1) entspricht.

Die Normalkomponente der Schnelle ist gleich der Auslenkung $d/2$ dividiert durch die Zeit eines Umlaufs $t = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$. Da diese Geschwindigkeit die Amplitude der Zeitfunktion ist, muß man noch mit dem Fourier-Koeffizienten $k_\nu$ multiplizieren, um die Schnelle $U_\nu$ der betreffenden Komponente zu erhalten. Es ist also

$$(7)\qquad U_\nu = \frac{\partial \Phi_\nu}{\partial n} = \frac{1}{4\pi} d\, m\, \omega\, k_\nu = \frac{1}{4\pi} \frac{d}{R} m\, v_u\, k_\nu,$$

$m = \nu \cdot z$

$z =$ Blattzahl

$v_u = \omega R$ Umfangsgeschwindigkeit.

Die Verteilung der Schnelle über dem Radius wird durch eine Funktion $f_1(r)$ berücksichtigt. Hiermit ist die Größe der Störung $\frac{\partial \Phi_\nu}{\partial n}$, die dem ersten Teil der Gleichung (1) entspricht, bestimmt.

Der Impuls der Schraube für einen Umlauf $t = \frac{2\pi}{\omega}$ und ein Radiuselement $dr$ ist

$$A \cdot \frac{2\pi}{\omega} = \Gamma \varrho\, v_u \frac{2\pi}{\omega},$$

worin $A$ den Auftrieb, $\Gamma$ die Zirkulation bezeichnen. Unter Berücksichtigung der Deutung des Potentials $\Phi$ im zweiten Teil der Gleichung (1) als Stoßdruck [11]) ergibt sich die Zirkulation je Umlauf und Schraubenblatt zu

$$(8)\qquad \Gamma = \Phi_0 - \Phi$$

$\Phi_0$ Potential auf der Oberseite des Profils

$\Phi_u$ Potential auf der Unterseite des Profils.

Bei einer Schraube mit $z$ Flügeln erhält man die $\nu$-te Komponente zu

$$(9)\qquad (\Phi_0 - \Phi_u)_\nu = \Gamma_\nu = \frac{z\Gamma}{m} k_\nu.$$

Die radiale Verteilung wird wieder durch Multiplikation mit einer Funktion $f_2(r)$ festgelegt.

[11]) Prandtl, L., Tietjens O., Hydro- und Aeromechanik, Berlin, Springer 1931.

Nach der Bestimmung der Größe von $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ und $\Phi$ der Elementarstrahler folgt die Berücksichtigung ihrer Phasenlage. Man unterscheidet zwischen einer räumlichen und einer zeitlichen Phase. Die zeitliche Phase $\delta_v$ der Elementarstrahler ist dadurch gegeben, daß die Störung durch die Drehung des Luftschraubenblattes an den einzelnen Stellen nacheinander erfolgt:

$$\delta_v = m \cdot \alpha \tag{10}$$

[$\alpha$ Drehwinkel].

Die räumliche Phase $\gamma_v$ entsteht durch die verschieden lange Laufzeit der Störung zum Aufpunkt, Abb. 2

$$\gamma_v = \frac{m\,\omega}{c} r \cos\alpha \cos\varphi\,. \tag{11}$$

Hierin ist $\varphi$ der Winkel, den der Fahrstrahl zum Aufpunkt mit der Luftschraubenebene bildet.

In dem Ausgangsintegral kann zunächst die Integration über $\alpha$ für einen Ring der Schraubenkreisfläche durchgeführt werden und führt auf Besselsche Funktionen $m$-ter Ordnung. Bei weit entferntem Aufpunkt im Abstand $R_P$ tritt der Ausdruck

$$\frac{1}{4\pi R_P} \cdot e^{im\left[\omega\left(t-\frac{R_P}{c}\right)-\frac{\pi}{2}\right]} \tag{12}$$

vor die Integrale. Er sei im folgenden fortgelassen, da er einfach die kugelförmige Ausbreitung des ganzen Vorganges wiedergibt. Somit erhält man für das resultierende Potential

$$\begin{aligned} \Phi_P = -m\,\omega\,k_v \Bigg[ & \int_{r=0}^{R} d \cdot f_1(r) \\ & \times I_m\left(m \frac{v_u}{c} \cos\varphi\right) r\,dr \\ & + i \frac{2\pi}{\nu c} \int_{r=0}^{R} \Gamma \sin\varphi \\ & \times f_2(r)\, I_m\left(m \frac{v_u}{c} \cos\varphi\right) r\,dr \Bigg] \end{aligned} \tag{13}$$

einen Ausdruck, der das gesamte Schallfeld der Schraube in Abhängigkeit von der Dicke $d$ und der Zirkulation $\Gamma$ des Profils wiedergibt.

Allgemein kann man folgendes aussagen: Durch die Dicke des Profils ist ein Strahler nullter Ordnung gegeben, der ein Feld ähnlich einer atmenden Kugel erregt, durch die Zirkulation dagegen ein Strahler erster Ordnung, der ein polarisiertes Feld erzeugt, wie es von einer hin- und herschwingenden starren Kugel herrührt. Die resultierende Richtcharakteristik erweist sich als symmetrisch, weil der Strahler erster Ordnung eine Phasenverschiebung von 90° gegenüber dem Strahler nullter Ordnung hat. Ferner erkennt man, daß mit zunehmender Ordnungszahl der Einfluß des Strahlers erster Ordnung geringer wird. Beides wird durch Meßergebnisse bestätigt.

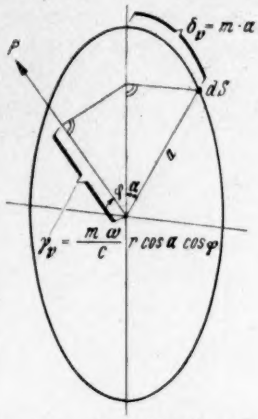



Abb. 2. Zeitliche Phase $\delta$ und räumliche Phase $\gamma_v$ des Elementarstrahlers $dS$

## Richtcharakteristik des Schraubenschalles

Das in den beiden Ausdrücken der Gleichung (13) vorkommende Integral, welches die Richtcharakteristik darstellt, wurde für vier verschiedene Funktionen $f_\mu(r)$ berechnet [12]). Beschränkt man sich auf den Strahler nullter Ordnung (Teil 1 der Gleichung (13)), so erhält man bei einer zweiflügligen Luftschraube ohne Anstellung für die Umfangsgeschwindigkeit $\frac{v_u}{c} = 0{,}5$ und 1 und für eine Funktion

$$f_\mu(r) = 2\,\frac{r}{R} \tag{14}$$

die in Abb. 3 gezeichneten Richtcharakteristiken.

Der Schall wird vornehmlich in der Richtung der Luftschraubenebene abstrahlt. Die Schallstärke nimmt mit der Umfangsgeschwindigkeit zu, denn in der oberen Hälfte der Abb. 3 ist der Maßstab verzehnfacht. Mit der Umfangsgeschwindigkeit ändert sich ebenfalls das Schallspektrum. Bei hoher Umfangsgeschwindigkeit überwiegen die Obertöne, das bedeutet harten hellen Klang (Metallschrauben, W 34). Bei

[12]) Ernsthausen, W., Strahlergruppen mit umlaufender Phase, Luftf.-Forschg. 15 (1938), S. 374.

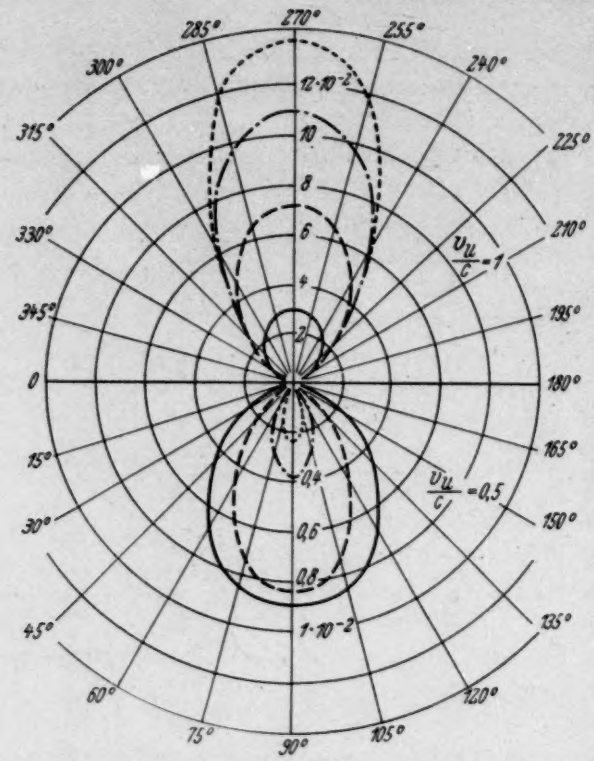



Abb. 3. Zur Richtcharakteristik des Luftschraubenschalles. Strahler nullter Ordnung

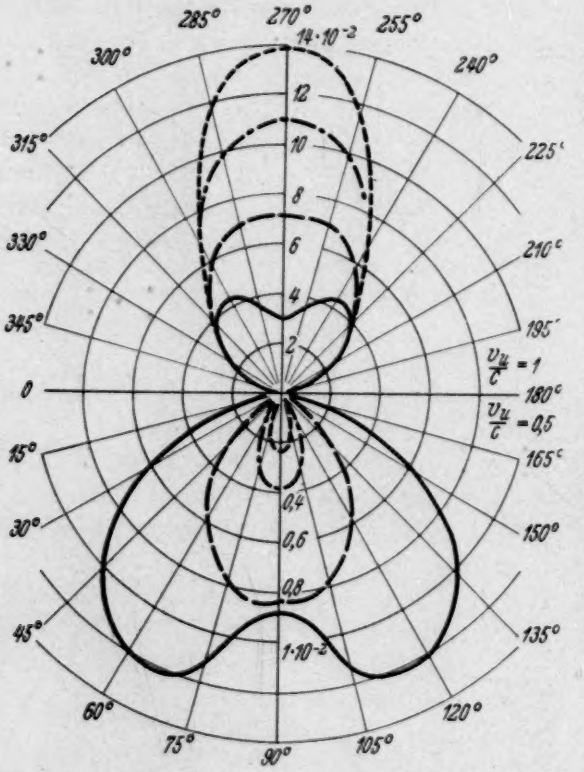



Abb. 4. Zur Richtcharakteristik des Luftschraubenschalles. Strahler nullter und erster Ordnung (3fache Stärke)

niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten überwiegt der Grundton, die Schraube klingt voll und dunkel (Holzschrauben).

Betrachtet man eine Schraube mit Anstellung, d. h. eine Schraube, die einen durch ihren Betriebszustand (Start, Reise-, Steigflug) bestimmten Schub erzeugt, so muß dies durch Hinzunehmen des Strahlers erster Ordnung (Teil 2 der Gleichung (13)) berücksichtigt werden.

In Abb. 4 sind dieselben Richtcharakteristiken dargestellt, wie sie sich durch das Hinzutreten eines Strahlers erster Ordnung verändern, dessen Moment dreimal so stark wie die Ergiebigkeit des Nullstrahlers ist. Die Erhöhung der Energie beschränkt sich fast ausschließlich auf den Grundton. Hieraus ist ersichtlich, daß eine Messung des Luftschraubenschalles immer unter den wirklichen Betriebsbedingungen erfolgen muß, und daß beispielsweise eine akustische Messung am Prüfstand ein anderes Bild ergeben muß als eine Messung im Fluge.

Das bisher Gesagte gilt nur für eine Luftschraube am Stand. Bei der Luftschraube mit Vorwärtsbewegung erfahren die Ergebnisse noch eine geringfügige Veränderung. Man kann die Vorwärtsbewegung durch Einführung einer relativen Ausbreitungsgeschwindigkeit $c'$ berücksichtigen, die sich aus der Fluggeschwindigkeit $v$, der Schallgeschwindigkeit $c$ und dem Ausbreitungswinkel zusammensetzt

$$c' = c\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}-\frac{2v}{c}\cos\varphi}\,. \tag{15}$$

Außer der Geschwindigkeitskorrektur erfordert die bewegte Luftschraube auch noch eine Amplitudenkorrektur, die jedoch in erster Näherung vernachlässigt werden kann. Die hauptsächliche Wirkung der Vorwärtsbewegung besteht darin, daß die Charakteristik in Richtung der Flugbewegung vorgeneigt wird. Bei einer Geschwindigkeit von 300 km/St beträgt die Vorneigung etwa 14°.

## Schalleistung der Luftschraube

Aus dem Geschwindigkeitspotential (Gleichung (13)) erhält man Schalldruck und Schallschnelle, und aus dem Produkt beider Größen

und durch Integration über eine die Schallquelle ganz umschließende Kugelfläche die Schalleistung der $\nu$-ten Komponente. Z. B. wird sie für eine Schraube ohne Anstellung und eine der Gleichung (15) entsprechende radiale Verteilung, die den praktischen Verhältnissen am nächsten kommt,

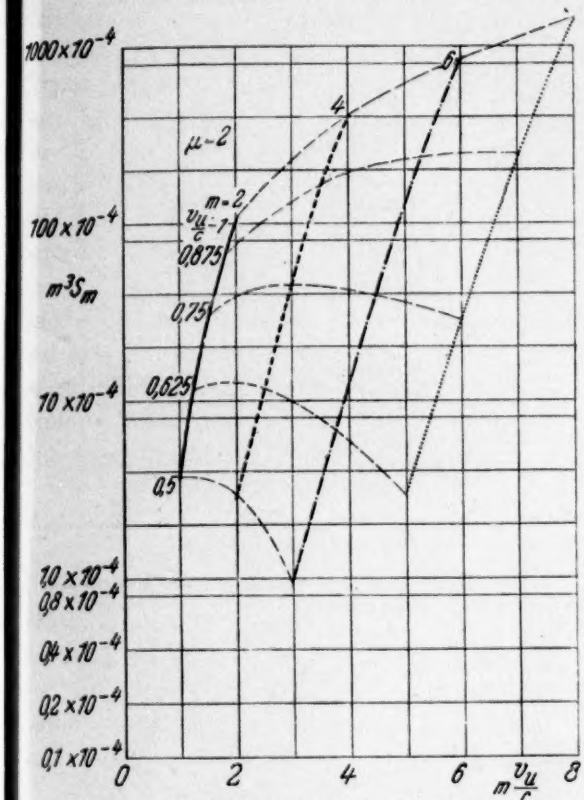



Abb. 5. Die Strahlungsleistung von Luftschrauben. Parameter Umfangsgeschwindigkeit

$$(16) \qquad N_\nu = \frac{2\pi}{9} \varrho \frac{d^2}{R^2} k_\nu^2 \omega^3 R^5 m^3 S_m\left(m \frac{v_u}{c}\right),$$

worin $S_m$ die sich durch Integration über das Quadrat der Richtcharakteristik ergebende Strahlungsfunktion bedeutet. Abb. 5 zeigt den Verlauf der Strahlungsfunktion. Es kommt darin zum Ausdruck, daß Luftschrauben mit hoher Umfangsgeschwindigkeit mehr Energie in den Obertönen als im Grundton abstrahlen, während bei niederen Umfangsgeschwindigkeiten der Grundton vorherrscht. Außerdem erkennt man, daß jedem $m$ eine Strahlungsfunktion zugeordnet ist, welcher selbst wieder ein eigener Strahler entsprechen muß. Die Strahlerfläche ist durch die Zahl ihrer Knotenlinien, d. h. durch die Zahl $m$ charakterisiert. Der so gegebene Schwingungszustand läuft mit der fortschreitenden Phase des Schraubenblattes um. Die ganze Schraube besteht dann

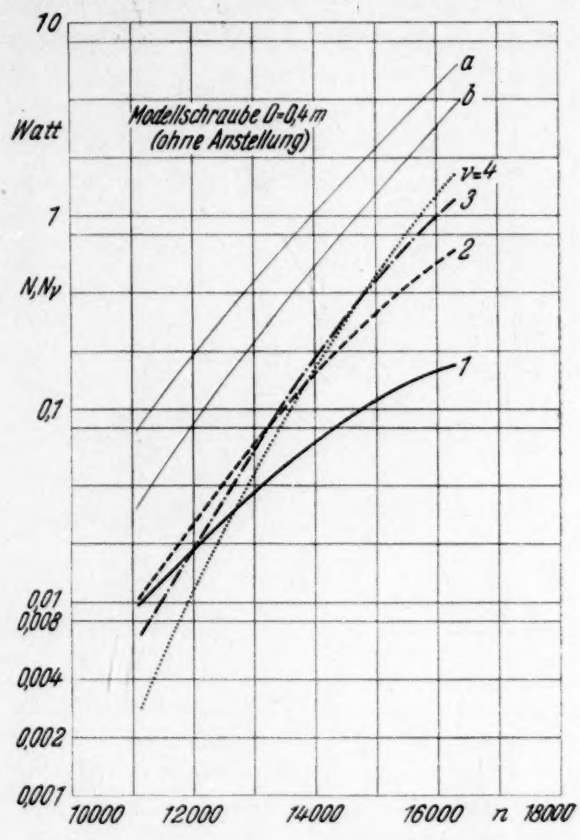



Abb. 6. Schalleistung einer Modellschraube; a) gemessen, b) berechnet aus den ersten 4 Teiltönen

akustisch gesehen aus $\nu$ in der Schraubenebene vereinigten Strahlern (s. Abb. 1).

Für eine Modellschraube berechnet sich nach Gleichung (16) der Verlauf der Schalleistung über der Drehzahl wie in Abb. 6 dargestellt. Als Vergleich ist ihre unter [10]) gemessene Schalleistung (Kurve *a*) angegeben.

Ähnlich erhält man für zwei häufig verwendete Luftschrauben mit sehr verschiedener Umfangsgeschwindigkeit die Diagramme der Abb. 7 und 8. Sie lassen erkennen, daß sich die Schalleistung der heute verwendeten Luftschrauben etwa in den Grenzen von 1—100 Watt bewegt.

Vergleicht man Gleichung (16) mit dem Ausdruck für die aerodynamische Luftschraubenleistung

$$N_L = k_d \frac{\varrho}{2} \pi \omega^3 R^5 \tag{17}$$

[$k_d$ Drehmomentbeiwert],

so erhält man den akustisch mechanischen Wirkungsgrad aus dem Verhältnis der beiden Leistungen zu

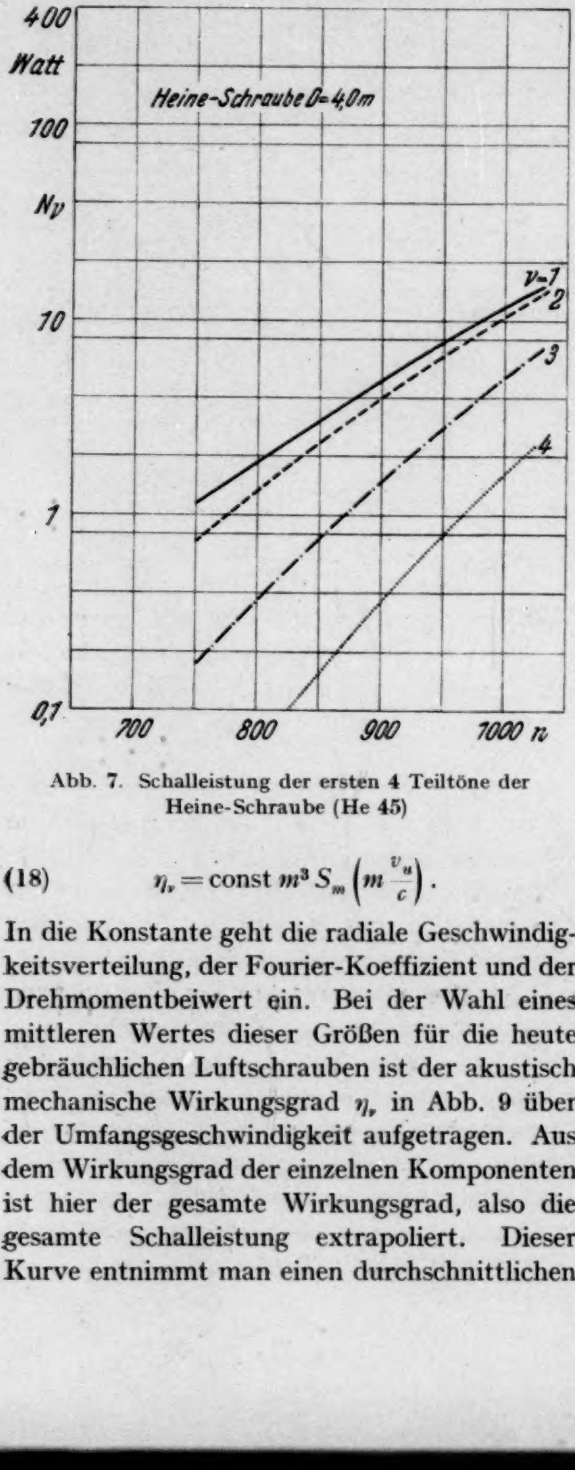



Abb. 7. Schalleistung der ersten 4 Teiltöne der Heine-Schraube (He 45)

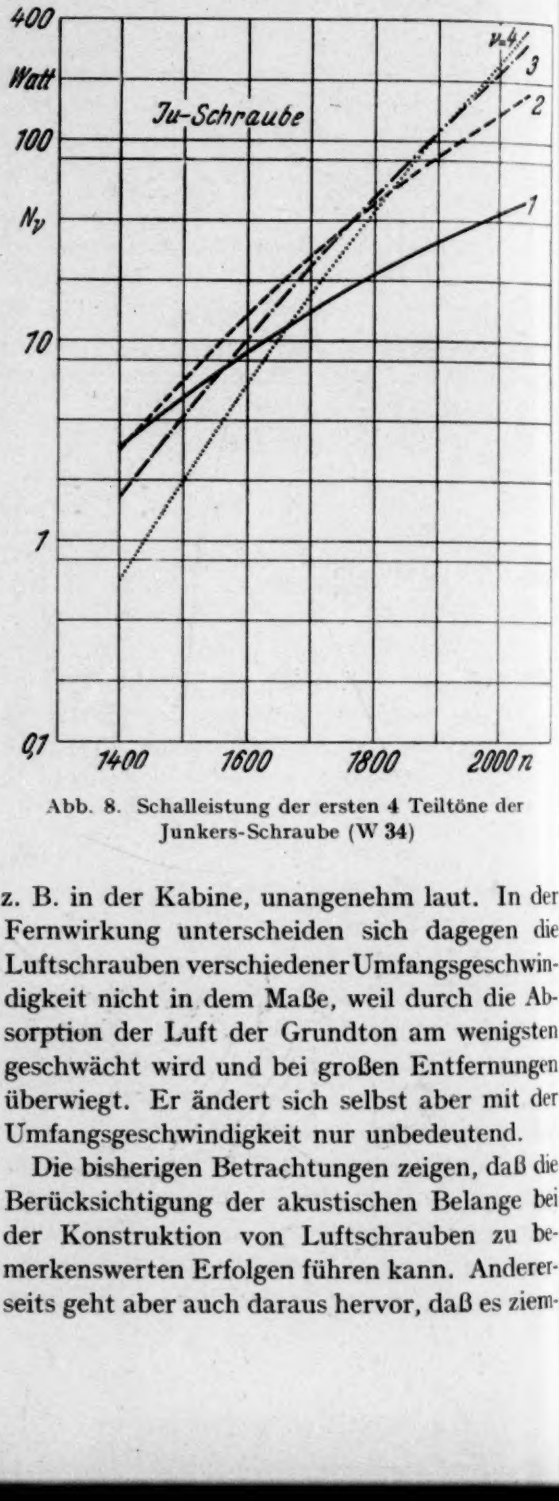



Abb. 8. Schalleistung der ersten 4 Teiltöne der Junkers-Schraube (W 34)

$$\eta_v = \text{const}\, m^3 S_m \left(m \frac{v_u}{c}\right). \tag{18}$$

In die Konstante geht die radiale Geschwindigkeitsverteilung, der Fourier-Koeffizient und der Drehmomentbeiwert ein. Bei der Wahl eines mittleren Wertes dieser Größen für die heute gebräuchlichen Luftschrauben ist der akustisch mechanische Wirkungsgrad $\eta_v$ in Abb. 9 über der Umfangsgeschwindigkeit aufgetragen. Aus dem Wirkungsgrad der einzelnen Komponenten ist hier der gesamte Wirkungsgrad, also die gesamte Schalleistung extrapoliert. Dieser Kurve entnimmt man einen durchschnittlichen $\eta$-Wert von rund 1 v. T. Im Bereich der Umfangsgeschwindigkeiten von 0,6 bis 0,95c ändert er sich ungefähr wie 1 : 30. Bei geringen Umfangsgeschwindigkeiten überwiegt der Grundton, bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten die Obertöne. Da diese für den Lautstärkeeindruck maßgebend sind, so sind Luftschrauben mit hoher Umfangsgeschwindigkeit in der Nähe, z. B. in der Kabine, unangenehm laut. In der Fernwirkung unterscheiden sich dagegen die Luftschrauben verschiedener Umfangsgeschwindigkeit nicht in dem Maße, weil durch die Absorption der Luft der Grundton am wenigsten geschwächt wird und bei großen Entfernungen überwiegt. Er ändert sich selbst aber mit der Umfangsgeschwindigkeit nur unbedeutend.

Die bisherigen Betrachtungen zeigen, daß die Berücksichtigung der akustischen Belange bei der Konstruktion von Luftschrauben zu bemerkenswerten Erfolgen führen kann. Andererseits geht aber auch daraus hervor, daß es ziem-

lich aussichtslos ist, durch eine verhältnismäßig geringfügige Veränderung der Blattform, des Profils bzw. des Profilfeldes eine Verminderung des Schalles zu erzielen.

## Schallmessung an Luftschrauben

An einer Reihe von Luftschrauben wurden zur Prüfung der Überlegungen Schallmessungen

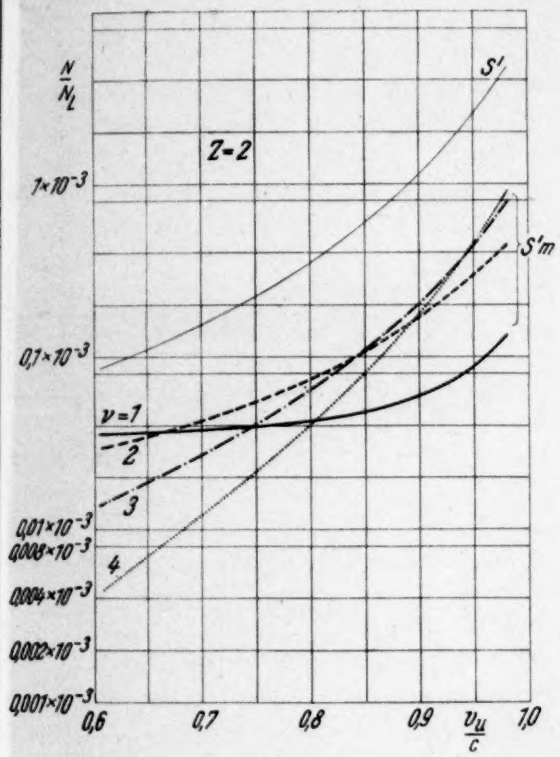



Abb. 9. Akustisch-mechanischer Wirkungsgrad von Luftschrauben

durchgeführt. Diese Messungen wurden unter normalen Betriebsbedingungen, also an der fliegenden Maschine vorgenommen. Es handelt sich um Zwei-, Drei- und Vierblattschrauben mit verschiedenen Umfangsgeschwindigkeiten. Die Richtcharakteristik des Schraubenschalles wurde beim An- und Abflug des Flugzeuges in einem möglichst großen Winkelbereich registriert. Hierbei tritt eine große Änderung des Meßabstandes und eine entsprechende Amplitudenänderung ein. Daher wurde ein Verfahren angewendet, das gleiche relative Meßgenauigkeit bei verschiedener Amplitude gewährleistet, d. h. ein Meßverfahren mit logarithmischer Anzeige. Es ist in Abb. 10 schematisch angegeben.

Zur Vermeidung von störenden Bodenreflexionen ist das Mikrophon in gleicher Höhe mit der Erdoberfläche angebracht. Der Verlauf der Gesamtstärke des Flugzeuggeräusches wurde mit einem Pegelschreiber (Neumann) aufgezeichnet. Er hat in der hier verwendeten Form einen Meßbereich von 50 db, d. h. einen Amplitudenbereich von 1 : 300. Wenn man von einem Gitter der Verstärkerröhre des Pegelschreibers eine Leitung zum Eingang des S. & H.-Spektrometers abzweigt, so erfüllt der Pegelschreiber überdies noch die Aufgabe eines

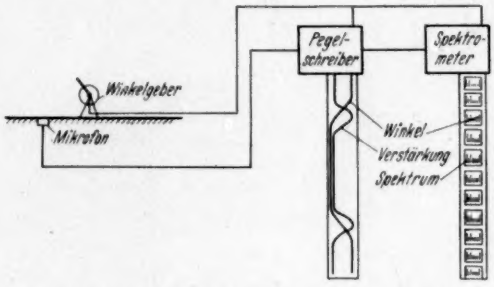



Abb. 10. Schema der Meßeinrichtung für Schallaufnahmen von Flugzeugen

Amplitudenreglers. Er hält die Ausgangsspannung bei veränderlicher Eingangsspannung konstant. Das Spektrum dieser konstanten Ausgangsspannung wird auf Schmalfilm laufend aufgenommen. Um eine Zuordnung von Pegelschreiberaufzeichnung und Filmbild zu ermöglichen, wird jeweils noch der Winkel aufgezeichnet, unter dem einem Beobachter das Flugzeug erscheint. Der Beobachter, der in der Nähe des Mikrophons steht, benutzt hierzu eine einfache Peilvorrichtung mit Fadenkreuz (Winkelgeber in Abb. 10). Die Winkelstellung wird elektrisch auf Pegelschreiber und Spektrometer übertragen.

Bei der Auswertung sind verschiedene Umrechnungen notwendig, um aus dem am Boden von einem feststehenden Beobachter gemessenen Schall auf die Richtcharakteristik des bewegten Flugzeuges zu gelangen:

1. Eine Frequenzkorrektion, die den Dopplereffekt berücksichtigt;

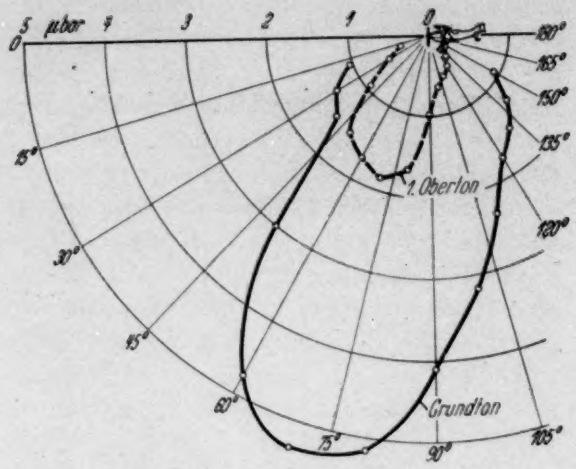



Abb. 11. Richtcharakteristik Schraube „5", vierflügelig (mittlere Umfangsgeschwindigkeit)

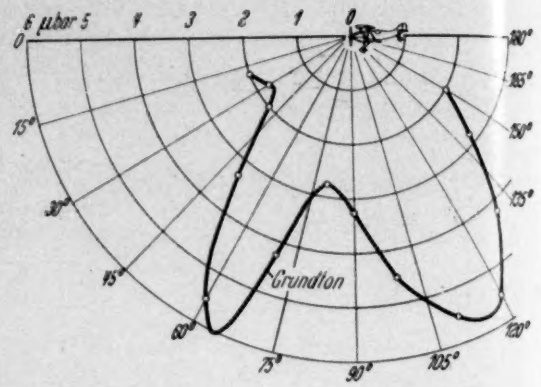



Abb. 12. Richtcharakteristik Schraube „3", dreiflügelig (niedrige Umfangsgeschwindigkeit)

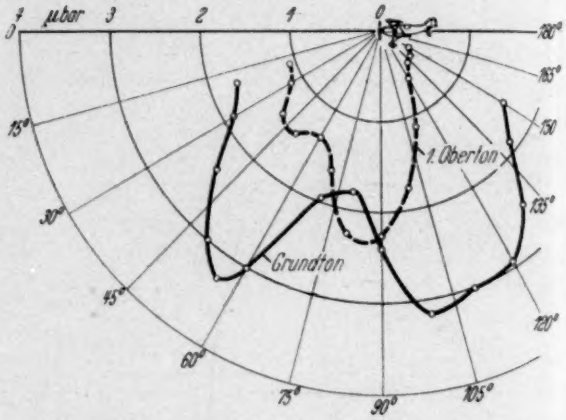



Abb. 13. Richtcharakteristik Schraube „1", zweiflügelig (hohe Umfangsgeschwindigkeit)

2. Eine Amplitudenkorrektion, die die Veränderung der Entfernung der Schallquelle während der Messung berücksichtigt;
3. Eine Winkelkorrektion, die dem Unterschied von Schallwinkel und Sichtwinkel Rechnung trägt, der durch den Unterschied von Schallgeschwindigkeit und Lichtgeschwindigkeit bedingt ist.

Mit diesen Korrektionen ergaben sich aus den Überfliegungsmessungen u. a. die in Abb. 11 bis Abb. 13 dargestellten Richtcharakteristiken.

Zunächst erkennt man in jedem Fall die durch die Horizontalgeschwindigkeit des Flugzeuges gegebene Vorneigung der Richtcharakteristik. Bei der vierflügeligen Schraube überwiegt der Strahler nullter Ordnung (Abb. 11). Die Abb. 12 und 13 beziehen sich auf dreiflüglige Schrauben und zeigen dementsprechend einen größeren Anteil des Strahlers erster Ordnung, der im Oberton zurückgeht. Außerdem steigt mit höherer Umfangsgeschwindigkeit (Abb. 13) die Energie des Obertones an gegenüber der Schraube mit niedriger Umfangsgeschwindigkeit (Abb. 12), bei welcher eine Messung nicht mehr möglich war.

An Hand dieser Beispiele und bei Betrachtung der sonst vorliegenden Meßergebnisse läßt sich zusammenfassend sagen, daß die Theorie durch die praktisch gewonnenen Ergebnisse bestätigt wird, und daß sie also trotz der vereinfachenden Annahmen die wesentlichen Erscheinungen des Luftschraubenschalles richtig wiedergibt.

*(Eingegangen am 12. August 1938)*

# Über die Schallschluckung mit Hilfe von gedämpften Resonatoren

Von W. Willms

Mitteilung aus dem Institut für Elektrophysik der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, E.V., Adlershof

*(Mit 7 Textabbildungen)*

Die Anwendung von Resonatoren in der Raum- und Bauakustik ist seit langem bekannt[1]). In neuester Zeit finden sie u. a. Verwendung als schallschluckende Elemente zur Schallminderung in Motorenprüfständen[2]). Andererseits sind Resonatoren und resonatorenähnliche Anordnungen auch zur Schalldämpfung von Flugzeugkabinen benutzt worden[3]).

Bei einem normalen HELMHOLTZ-Resonator ist die Dämpfung fast ausschließlich durch die Strahlungsdämpfung gegeben. Andere energieverzehrende Widerstände sind nicht vorhanden; infolgedessen entzieht der Resonator dem Schallfeld nur an der Resonanzstelle und auch dort nur eine sehr geringe Energie, weil der Strahlungswiderstand gering ist. Bringt man aber einen Reibungswiderstand an, indem man ein Tuch über die Resonatoröffnung spannt oder einen Filzstopfen in den Resonantorhals einsetzt, so wird die Dämpfung stark erhöht und der Resonator entzieht dem Schallfeld mehr Energie. Diese Anordnung soll als gedämpfter Resonator bezeichnet werden.

Da in den Anwendungen meist nicht ein einzelner Resonator, sondern Gruppen von Resonatoren verwendet werden, die in einer Wand angeordnet sind, soll die Ableitung hierfür gegeben werden. Wir beschränken uns ferner auf eine senkrecht zur Wand einfallende Welle, also auf die gleichphasige Erregung aller Resonatoren.

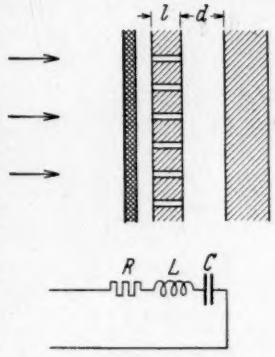



Abb. 1. Anordnung der Resonatoren und des Dämpfungswiderstandes

Die Resonatorwand Abb. 1 besteht etwa aus einer mit Lochsteinen aufgeführten Wand, die in einem Abstand $d$ vor der festen Wand errichtet wurde. Der Zwischenraum bildet die Federung, die Luft in den Löchern der Lochsteine die Maße des Resonators. Der Dämpfungswiderstand wird zweckmäßig in Form einer Platte (z. B. Holzfaserplatte) oder als Bespannung aus einem filzartigen Stoff vor den Lochsteinen angebracht.

Der Widerstand der Anordnung setzt sich aus drei Anteilen zusammen:

1. Massenwiderstand $i\,\omega\,\varrho\,l\cdot\varepsilon$,
   $\varrho$ Luftdichte
   $\varepsilon$ rührt von der Geschwindigkeitstransformation durch die Querschnittsverengung her. $\varepsilon = \frac{\text{Gesamtfläche}}{\text{Lochfläche}}$.
2. Federungswiderstand $\frac{\varrho\,c^2}{i\,\omega\,d}$.
   $c$ Schallgeschwindigkeit
3. Reibungswiderstand $R$.

Hierbei wird angenommen, daß sich der Dämpfungswiderstand nicht mehr im Gebiet

[1]) E. C. WENTE, E. H. BEDELL, The measurement of acoustic impedance and the absorption coefficeient of porous materials. Bell. Syst. 7 (1928), S. 1. Siehe auch die Arbeit: P. THIELSCHER, Über die Schallgefäße der griechischen Tragödie und der christlichen Kirchen. Akust. Z. 3 (1938), S. 85.

[2]) W. ZELLER, Schalldämpfung durch Luftresonatoren im Bauwesen. Akust. Z. 3 (1938), S. 32.

[3]) H. WEHNER, W. WILLMS, Die Erfolge der Entlärmung in Flugzeugkabinen. Luftwissen 5 (1938), S. 121.

der Geschwindigkeitstransformation befindet (Abb. 1). Wird der Dämpfungswiderstand jedoch in die Löcher selbst hineingebracht, so vergrößert sich der wirksame Widerstand um den Faktor $\varepsilon$.

Als Gesamtwiderstand $W$ ergibt sich somit

$$W = R + i\left(\omega \varrho \varepsilon l - \frac{\varrho c^2}{\omega d}\right) \tag{1}$$

in Analogie zu dem elektrischen Ersatzbild Abb. 1.

$$W = R + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right).$$

Hierbei entsprechen sich wechselseitig

$$L \text{ und } \varrho \varepsilon l,$$

$$C \text{ und } \frac{d}{\varrho c^2}.$$

Wir dividieren Gleichung (1) noch durch den Wellenwiderstand $Z = \varrho c$ und führen die dimensionslosen Größen

$$\alpha = \frac{R}{Z}\ ;\ \beta = \frac{1}{Z}\sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\varepsilon l}{d}}\ ;$$

$$\gamma = \omega \sqrt{LC} = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon l d}$$

ein. Damit ergibt sich aus (1)

$$\frac{W}{Z} = \alpha + i\beta\left(\gamma - \frac{1}{\gamma}\right). \tag{2}$$

Wird die Resonatorwand von einer einfallenden Welle beaufschlagt, so wird ein Teil zurückgeworfen. Dieser bestimmt sich aus dem Reflexionsfaktor zu

$$r = \frac{W - \varrho c}{W + \varrho c} = \frac{\frac{W}{Z} - 1}{\frac{W}{Z} + 1}.$$

Der Schluckgrad $s$ schließlich ist durch

$$s = 1 - |r|^2$$

definiert und kann nun ohne weiteres ausgerechnet werden. Man erhält:

$$s = \frac{4\alpha}{(\alpha+1)^2 + \beta^2\left(\gamma - \frac{1}{\gamma}\right)^2}. \tag{3}$$

Dieser Ausdruck ist in Abhängigkeit von $\alpha$ und $\gamma$ in Abb. 2 dargestellt. ($\beta = 2 = \text{const.}$) An der Resonanzstelle $\gamma = 1$ ist ein Schluckgrad von 100% zu erzielen, wenn $\alpha = 1$, d. h. $R = Z$ ist. Dies ist durch einen Blick auf das elektrische Ersatzbild ohne weiteres klar. Weicht $R$ vom Werte des Wellenwiderstandes ab, so ist die Schallschluckung im Maximum geringer. (Z. B. $\alpha = 5$ und 0,2). Dabei ist ein zu großer Dämpfungswiderstand günstiger als ein zu kleiner, weil er den Frequenzbereich der Schallschluckung vergrößert.

Aus Abb. 3 geht die Abhängigkeit der Schallschluckung von $\beta$ und $\gamma$ hervor. ($\alpha = 1 = \text{const.}$) Damit die Schallschluckung in

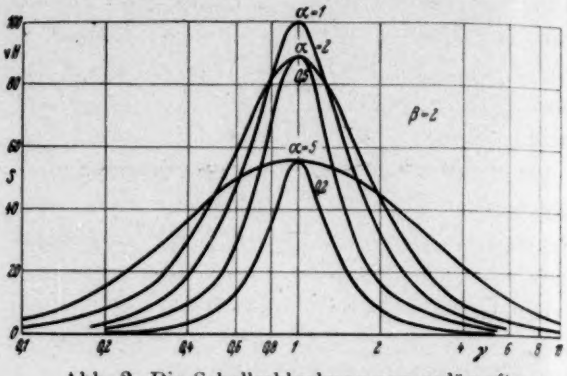



Abb. 2. Die Schallschluckung von gedämpften Resonatoren bei verschiedenen Dämpfungswiderständen

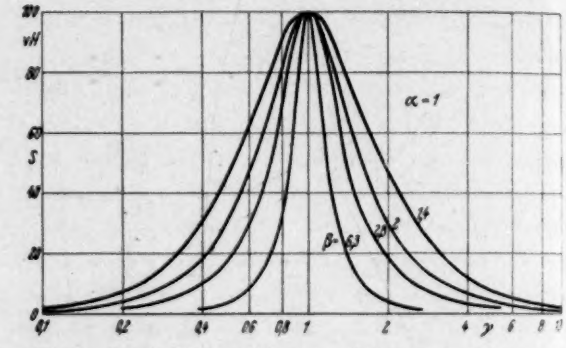



Abb. 3. Einfluß von Hohlraumtiefe und Lochlänge auf die Schallschluckung

einem möglichst großen Frequenzbereich erfolgt, ist es zweckmäßig $\beta$ klein zu wählen, d. h. $d$ groß zu machen. Gleichzeitig müssen $\varepsilon$ und $l$ kleine Werte haben. Dies wird man nicht immer erreichen können, wenn die Resonanzfrequenz bei tiefen Frequenzen liegen soll, weil sich dann die Forderungen gegenseitig ausschließen. Im allgemeinen ist die Resonanzfrequenz gegeben und ein bestimmtes Muster eines Lochsteines, so daß damit $\beta$ bereits festgelegt ist.

Der Dämpfungswiderstand $R$ kann mittels Durchströmung mit einem gleichmäßigen Luft-

strom gemessen werden. Der günstigste Wert von 40 akustischen Ohm wird von leichten Filzsorten und von Holzfaserplatten ungefähr erreicht.

Zur Kontrolle wurden Resonatoranordnungen in einem KUNDTschen Rohr gemessen (Abb. 4). Es hat eine Länge von 4 m und einen Durchmesser von 30 cm. In der Mittelachse ist ein kleines Kondensatormikrophon auf einer Gleitbahn verschiebbar angebracht. Aus den stehenden Wellen, die sich im Rohr ausbilden, kann man den Schluckgrad des Rohrabschlusses berechnen [4]).

In Abb. 5 sind Messungen der Schallschluckung eines mit Lochsteinen aufgeführten Resonators wiedergegeben. Der Stein ist 9 cm stark, die Löcher haben einen Durchmesser von 1 cm und einen Abstand von 2,7 cm. Diese verhältnismäßig engen Kanäle haben schon eine merkliche Reibungsdämpfung, so daß die Schallschluckung des Lochsteins ohne Dämpfungswiderstand (Kurve I) immerhin schon auf 70% ansteigt. Durch Vorschalten eines Dämpfungswiderstandes in Form einer Holzfaserplatte wird die Schallschluckung beträchtlich vergrößert (Kurve II). Bemerkenswert ist der Anstieg der Kurve bei hohen Frequenzen, der auf die Schallschluckung der Holzfaserplatte allein zurückzuführen ist. Durch Vergrößerung des Abstandes der Holzfaserplatte von den Lochsteinen kann der Anstieg nach tiefen Frequenzen hin verschoben werden und man kommt dadurch zu einer Anordnung, die sich durch hohe Schallschluckung in einem breiten Frequenzgebiet und durch einen starken Anstieg bei tiefen Frequenzen auszeichnet (Abb. 6). Um ein Abfallen des Schluckgrades bei hohen Frequenzen zu verhindern, wurde der Raum zwischen Holzfaserplatte und Lochstein lose mit Schlackenwolle angefüllt. Das Luftpolster ist bei dieser Anordnung nur 5 cm stark. Hierauf ist die Erhöhung der Resonanzstelle von 120 Hz in Abb. 5 auf ca. 160 Hz in Abb. 6 zurückzuführen. Es ist übrigens eine ähnliche

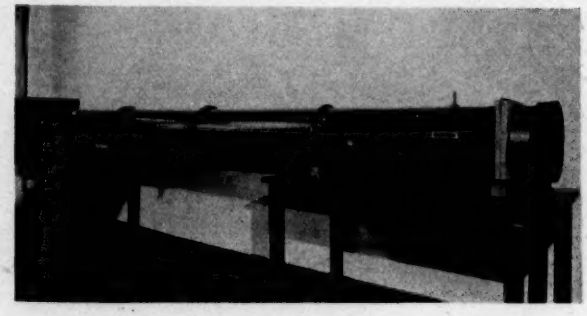


Abb. 4. KUNDTsches Rohr zur Messung der Schallschluckung mit Hilfe der stehenden Wellen im Rohr

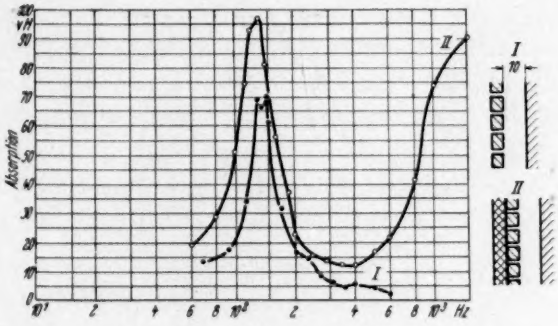



Abb. 5. Die Schallschluckung eines ungedämpften (Kurve I) und eines gedämpften Resonators (Kurve II)

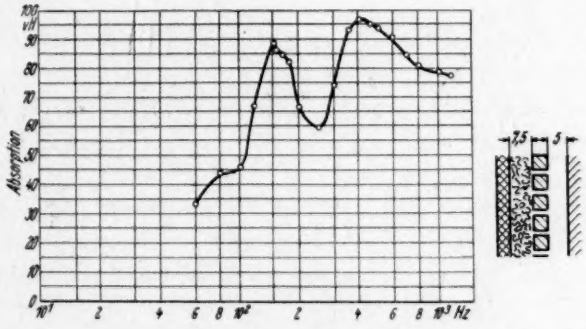



Abb. 6. Auordnung zur Erzielung einer hohen Schallschluckung in einem großen Frequenzbereich, insbesondere bei tiefen Frequenzen

Anordnung, wie sie WINTERGERST [5]) auf Grund von Überlegungen über die Frequenzabhängigkeit des Wandwiderstandes von porösen Stoffen vorgeschlagen hat.

An Stelle des aus Lochsteinen aufgebauten Resonators können auch aus Membranen ge-

[4]) E. WINTERGERST, H. KLUPP. Grundlegende Untersuchungen über Schallabsorption. Z. VDI 77 (1933), S. 91.

[5]) E. WINTERGERST, Theorie der Schallabsorption von Wandbekleidungen Z. techn. Physik 16 (1935), S. 570.

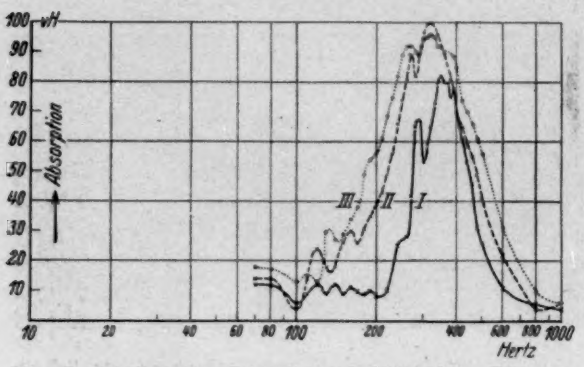



Abb. 7. Einfluß der Dämpfung bei Membran-Resonatoren. I Wachstuch ungedämpft, II Wachstuch mit Filz hinterlegt, III Hohlraum mit Watte angefüllt

bildete Resonatoren treten. In Abb. 7 sind die Kurven des Schallschluckgrades für drei verschieden stark gedämpfte Membran-Resonatoren wiedergegeben. Kurve I zeigt die Schallschluckung des ungedämpften Resonators, der aus einem gespannten Wachstuch und einer Luftschicht von 5 cm Stärke bestand. Bei Dämpfung des Resonators durch Hinterlegen des Wachstuchs mit einer Filzschicht von 4 mm Stärke entsteht Kurve II. Wird der ganze Hohlraum mit Watte ausgefüllt, so erhält man eine noch etwas größere Schallschluckung (Kurve III). Auf die Nützlichkeit der Dämpfung von Membran-Resonatoren hat E. MEYER[6]) bereits hingewiesen, wenn es sich dort auch um die Dämpfung der durch Kopplung angeregten Querschwingungen des Hohlraumes handelt.

Zur Erzielung einer Schallschluckung in einem größeren Frequenzbereich ist es wiederum erforderlich wie bei Abb. 6 den Dämpfungswiderstand im Abstand von einigen Zentimetern vor dem Membran-Resonator anzubringen.

[6]) E. MEYER, Über das Schallschluckvermögen schwingungsfähiger, nichtporöser Stoffe. Elektr. Nachr.-Techn. **13** (1936), S. 95.

*(Eingegangen am 2. September 1938.)*

# Ein Tonschwankungsmesser

Mitteilung aus dem Arbeitsgebiet der Klangfilm G. m. b. H.

Von K. H. R. Weber (Telefunken G. m. b. H.)

*(Mit 12 Textabbildungen)*

## 1. Einleitung

Seit langem sind in der Elektroakustik Verzerrungen bekannt, die als Amplituden- und Frequenz- oder Phasenmodulation übertragener Töne aufzufassen sind[1]). Eine solche Störung soll allgemein mit „Tonschwankung" bezeichnet werden und ein entsprechendes Meßgerät mit „Tonschwankungsmesser".

Geringe Amplitudenmodulationen entstehen beispielsweise in gewissen Arten wechselstrombetriebener Verstärker. Bedeutend größer ist die Möglichkeit irgendeiner Modulation dort, wo Aufzeichnungsträger verwendet werden, die relativ zur Aufzeichnungs- oder Abtastvorrichtung mechanisch bewegt werden müssen. Auch der Aufzeichnungsträger selbst kann durch den Entwicklungs- und Vervielfältigungsprozeß derartige Verzerrungen erleiden. Neuerdings[2]) hat man sogar gefunden, daß der photographische Entwicklungsprozeß beim Tonfilm alle Schwankungsarten hervorrufen kann.

Die Untersuchung solcher Feinheiten wurde erst möglich, als man die auf anderen Arbeitsgebieten geläufigen Demodulationsverfahren auf die Tonschwankungsmessung anwendete[3–6]). Man erhält dabei ein unmittelbar anschauliches Bild von den Größen und den Frequenzen der störenden Schwankungen. Im folgenden soll über einen derartigen Tonschwankungsmesser berichtet werden.

## 2. Meßverfahren

Die Messung der Tonschwankungen geht nach dem angedeuteten Verfahren so vor sich, daß auf das zu untersuchende Übertragungsglied eine reine Trägerfrequenz (etwa 3000 Hz) gegeben wird und daß die im Übertragungsglied hervorgerufene Modulation dieser Trägerfrequenz gemessen wird. Dieses geschieht durch Demodulation, wobei die Trägerfrequenz herausfällt und die Schwankungen nach Größe und Frequenz zutage treten. Die Demodulation einer Amplitudenmodulation erfolgt in bekannter Weise mittels Gleichrichter, Kondensator und Ableitwiderstand. Eine Frequenz- oder Phasenmodulation wird zunächst durch einen frequenzabhängigen Widerstand in eine entsprechende Amplitudenmodulation verwandelt und dann demoduliert. Die zu untersuchende Trägerfrequenz kann alle Modulationsarten gleichzeitig enthalten. Daher sind besondere Maßnahmen zur Trennung der zu messenden Größen notwendig. Dabei ist zu bedenken, daß die Amplitudenmodulation durch eine gleichzeitig vorhandene Frequenz- oder Phasenmodulation nicht gestört wird, wohl aber umgekehrt.

[1]) Fischer-Lichte, Tonfilm, Leipzig 1931.

[2]) J. G. Frayne and V. Pagliarulo, The influence of sprocket holes upon the development of adjacent sound-track areas, J. Soc. Mot. Pict. Eng. 28 (1937), I, S. 235—245.

[3]) T. E. Shea, W. A. MacNair and V. Subrizi, Flutter in sound records, J. Soc. Mot. Pict. Eng. 25 (1935), II, S. 403—415.

[4]) R. R. Scoville, A portable flutter-measuring instrument, J. Soc. Mot. Pict. Eng. 25 (1935), II, S. 416—422.

[5]) E. W. Kellogg and A. R. Morgan, Measurement of Speed Fluctuations in Sound Recording and Reproducing Equipment, J. Acoust. Soc. of Amer. 7 (1935—36), S. 271—280.

[6]) R. R. Scoville, A laboratory flutter-measuring instrument, J. Soc. Mot. Pict. Eng. 29 (1937), II, S. 209—215.

Zur Ausschaltung der Amplitudenmodulation sind zwei Verfahren erprobt worden. Das erste[3)4)6)] umgeht die Schwierigkeit dadurch, daß die Frequenzschwankung in eine so hohe Amplitudenschwankung umgewandelt wird, daß die störende Amplitudenmodulation in allen praktischen Fällen dagegen verschwindet. Dieses Umwandlungsverfahren bedingt einen frequenzabhängigen Widerstand großer Steilheit, auf dem daher nur ein verhältnismäßig schmales Frequenzband untergebracht werden kann. Die Einhaltung des Arbeitspunktes ist deswegen kritisch. Da in praktischen Fällen mit einer Ungenauigkeit der Trägerfrequenz von $\pm$ 10% zu rechnen ist, muß eine Frequenztransformation vorgesehen werden, damit der richtige Arbeitspunkt jeweils eingestellt werden kann.

Das zweite Verfahren[5)7)] kompensiert die störenden Amplitudenschwankungen dadurch, daß die Trägerfrequenz über zwei Wege geleitet wird, in denen die Störung in Gleichtakt schwingt, die aus der Frequenzmodulation erhaltene Amplitudenmodulation aber in Gegentakt. Allein letztere kommt über eine ausgangsseitige Brückenschaltung zur Wirkung. Dieses zweite Verfahren wird bei dem vorliegenden Gerät angewendet und soll daher eingehender besprochen werden.

Abb. 1 erläutert das grundsätzliche Meßverfahren. Die zu untersuchende frequenz-

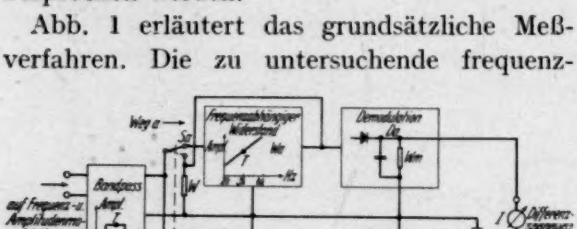



Abb. 1. Erläuterung des Meßverfahrens

und amplitudenmodulierte Trägerfrequenz von 3000 Hz wird zunächst über einen Bandpaß zulässiger Breite geschickt, um Störfrequenzen soweit wie möglich zu beseitigen. Hinter dem Filter wird eine Umschaltung vorgenommen, je nachdem, ob Frequenz- oder Amplitudenmodulation gemessen werden soll. Der ersteren Messung entspricht die Stellung des Schalters $S$: die frequenzmodulierte Spannung läuft zwei getrennte Wege $a$ und $b$ weiter. In den frequenzabhängigen Widerständen $W_a$ und $W_b$ wird der frequenzmodulierte Träger in einen amplitudenmodulierten umgewandelt. Dies wird beispielsweise nach Abb. 1 so vorgenommen, daß in $W_a$ eine Erhöhung der Frequenz eine Erhöhung der Amplitude bewirkt, während in $W_b$ umgekehrt eine Erhöhung der Frequenz eine Verminderung der Amplitude hervorruft. Dementsprechend entsteht in den Demodulationsschaltungen $D_a$ und $D_b$, in denen die Trägerfrequenz herausfällt, an den Widerständen $W_m$ und $W_n$ eine entsprechende Gleichspannungserhöhung und Verminderung. Die Differenzspannung, die mit einem geeigneten Instrument $I$ gemessen wird, ist zunächst ein Maß für die Größe der Amplitudenänderung und über den Umwandlungsfaktor von $W_a$ und $W_b$ auch ein solches für die Frequenzänderung. Liegt eine periodische Frequenzänderung vor, so ist die Differenzspannung eine Wechselspannung bestimmter Frequenz und gibt durch ihre Größe den Modulationsgrad des Trägers an. Die Zweiwegschaltung mit den Widerständen $W_a$ und $W_b$ bewirkt die Kompensation einer auf den Eingang gelangenden störenden Amplitudenmodulation, mit der man in praktischen Fällen neben der Frequenzmodulation rechnen muß. Während die aus der Frequenzmodulation entstandene Amplitudenmodulation in Gegentakt zum Voltmeter $I$ gelangt, läuft die ursprüngliche Amplitudenmodulation in Gleichtakt über die beiden Zweige und bewirkt deswegen bei $I$ keine Differenzspannung.

Zur Messung der Amplitudenmodulation wird durch den Schalter $S$ der Weg $b$ abgeschaltet. An Stelle von $W_a$ tritt ein fester Widerstand $W$ und an Stelle der Spannung an $W_n$ eine feste Spannung der Batterie $B_b$. Die durch $I$ angezeigte Differenzspannung ist jetzt ein Maß für

[7)] Brit. Pat. 447772 vom 24. November 1934. Electrical Research Products Inc. und C. J. P. SMALL, An improved Method of Measuring the Amount of Frequency Modulation of Sound Waves Recorded on a Film Introduced during the Reproduction of the Sound.

die Größe der Amplitudenmodulation. Eine Frequenzmodulation tritt nicht in Erscheinung, da keine Umformung in Amplitudenmodulation stattfindet.

### 3. Zur Theorie

Während sich eine Erörterung über Fragen der Amplitudenmodulation und -demodulation erübrigt, sind einige Fragen betreffend Frequenzmodulation und ihre Umwandlung kurz zu erwähnen.

Frequenz- und Phasenmodulation. Zwischen Frequenz- und Phasenmodulation besteht kein grundlegender Unterschied. Beide Modulationsarten gehorchen dem mathematischen Ausdruck:

1) Momentanamplitude

$$A = A_0 \sin\left(2\pi f_0 t + \frac{\Delta f}{f_m} \sin 2\pi f_m t\right);$$

dabei bedeuten: $f_0$ Trägerfrequenz, $\Delta f$ maximale Frequenzänderung des Trägers (Frequenzhub), $f_m$ Modulationsfrequenz. Der Faktor $\Delta f/f_m$ gibt die maximale Phasenänderung (Phasenwinkel) an. Man spricht von Phasenmodulation, wenn für alle $f_m$ $\Delta f$ eine solche Größe hat, daß der Phasenwinkel $\Delta f/f_m$ konstant ist, und von Frequenzmodulation, wenn der Frequenzhub $\Delta f$ unabhängig von $f_m$ konstant ist.

In der Hochfrequenztechnik, in der auf der Senderseite absichtlich oder unabsichtlich Frequenz- oder Phasenmodulation erzeugt wird, liegt dementsprechend fest, auf welche der beiden Modulationsarten die empfangsseitige Demodulationsschaltung ansprechen soll. Im Falle des Tonschwankungsmessers ist man nicht gezwungen, sich grundsätzlich auf eine bestimmte Modulationsart festzulegen, denn man kann nicht sagen, daß eine der beiden beabsichtigt sei. Interessieren die Winkelgeschwindigkeitsänderungen bei Maschinen, so wird man zweckmäßig Frequenzmodulation messen, da dann das Meßergebnis unmittelbar ein Maß für die Geschwindigkeitsänderung bei verschiedenen Modulationsfrequenzen ist. Im Grunde ist die Frage, welche Demodulationsart zu wählen ist, eine Frage der Meßgenauigkeit für verschiedene Modulationsfrequenzen. Die Messung als Phasenmodulation erscheint auf alle Fälle ungünstig, da dann die Meßempfindlichkeit gegenüber einer Messung als Frequenzmodulation proportional mit der Modulationsfrequenz abnimmt. Es ist daher auch beim vorliegenden Tonschwankungsmesser eine Messung der Frequenzmodulation vorgesehen.

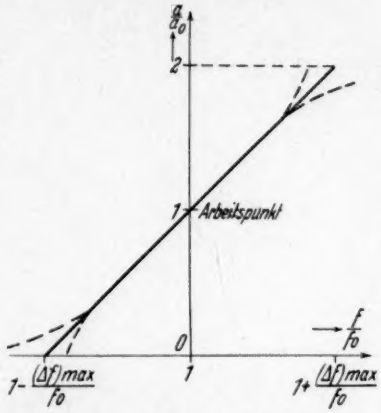



Abb. 2. Die Charakteristik des frequenzabhängigen Widerstandes: $a/a_0$ relative Amplitude, $f/f_0$ relative Frequenz

Der Umformungsfaktor. Man hat es in der Hand, durch die Charakteristik des frequenzabhängigen Widerstandes einen bestimmten Frequenzmodulationsgrad in einen beliebigen Amplitudenmodulationsgrad zu verwandeln. Der Umformungsfaktor $u$ ist gegeben durch die Steilheit der Widerstandskennlinie, genauer durch die Abhängigkeit der relativen Amplitude $a/a_0$ von der relativen Frequenz $f/f_0$ ($f_0$ = Trägerfrequenz, $a_0$ = Amplitude bei der Frequenz $f_0$):

$$u = \frac{f_0 \Delta a}{a_0 \Delta f}. \tag{2}$$

Nach Abb. 2 gibt es zu jedem $u$ ein $(\Delta f)_{max}$, bei dem $a = 0$ wird, also hundertprozentige Amplitudenmodulation erreicht wird. Der Um-

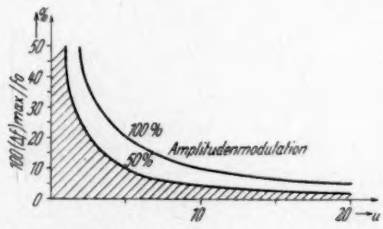



Abb. 3. Beziehung zwischen Umwandlungsfaktor $u$ und prozentualer Frequenz- und Amplitudenmodulation

formungsfaktor kann daher für eine gegebene Frequenzschwankung nicht beliebig groß gemacht werden. Die Grenzkurven sind in Abb. 3 dargestellt, und zwar für 100%ige und 50%ige Amplitudenmodulation. Nur etwa das gestrichelte Gebiet ist von praktischer Bedeutung, da die Widerstandscharakteristik nicht restlos gradlinig ausgebildet werden kann, wie in Abb. 2 angedeutet wurde. Der Umformungsfaktor ist von der Wahl des Arbeitspunktes auf der Widerstandsgeraden abhängig. Aus Gleichung (2) ergibt sich, daß $u$ mit abnehmendem $a_0$ zunimmt und umgekehrt. Verwendet man daher zur Umformung zwei Wege mit positiver und negativer Widerstandscharakteristik, so bleibt die Summe der beiden Umformungsfaktoren konstant, wenn die Verschiebung von $f_0$ nicht zu groß wird.

Diese Betrachtungen gelten ohne weiteres, wenn die Modulationsfrequenz genügend tief liegt, d. h. wenn das Problem statisch aufgefaßt werden kann. Bei höheren Frequenzen ist das vorhandene Frequenzspektrum zu berücksichtigen.

Frequenzhub und Seitenfrequenzpaare. Bekanntlich ist Gleichung (1), wie von LAUTENSCHLAGER[8]) experimentell geprüft wurde, identisch mit dem Ausdruck

$$(3) \qquad A = A_0 \sum_{-\infty}^{+\infty} J_\nu \left(\frac{\Delta f}{f_m}\right) \sin 2\pi (f_0 + \nu f_m) t ,$$

wobei die $J_\nu \left(\frac{\Delta f}{f_m}\right)$ BESSELsche Funktionen sind, für die $J_{-\nu} = -J_\nu$ gilt. Es liegt danach ein symmetrisch zur Trägerfrequenz $f_0$ liegendes Frequenzspektrum vor, mit Seitenfrequenzpaaren gleicher Amplitude im jeweiligen Abstand $f_m$. Die Funktionen $J_\nu$ sind in der Literatur verschiedentlich dargestellt und veranschaulicht[1])[3])[5])[8])[9]). Es zeigt sich, daß der Hauptteil des Spektrums innerhalb des Bereiches $\pm \Delta f$ liegt, solange $f_m < \Delta f$ ist. Ist $f_m > \Delta f$, so liegen alle Seitenkomponenten außerhalb des Bereiches, aber nur das erste Seitenpaar ist von Bedeutung. Man hat so einen Anhalt für die Dimensionierung der Bandbreite des frequenzabhängigen zur Umwandlung in Amplitudenmodulation dienenden Widerstandes. Je größer die gewünschte Bandbreite, um so kleiner muß nach Gleichung (2) der Umwandlungsfaktor $u$ gewählt werden. Es ist ein Nachteil des unter 2. erwähnten anderen Meßverfahrens, bei dem der Umwandlungsfaktor groß gewählt werden muß, daß die Bandbreite entsprechend klein ist.

Die Genauigkeit der Umwandlung soll hier nicht untersucht werden. Die Erfahrung hat bisher gezeigt, daß neu entstehende fremde Frequenzen nicht beobachtbar sind. Eine reine Oberwellenbildung dürfte kaum auffallen, da die zu messenden Grundschwingungen im allgemeinen reich daran sind.

## 4. Aufbau des Tonschwankungsmessers

In Abb. 4 ist die Schaltung des Tonschwankungsmessers wiedergegeben, und zwar unter Fortlassung aller der Schaltelemente, die ausschließlich der Verstärkerwirkung und der Stromversorgung dienen. Hierdurch wird eine bessere Übersichtlichkeit erreicht.

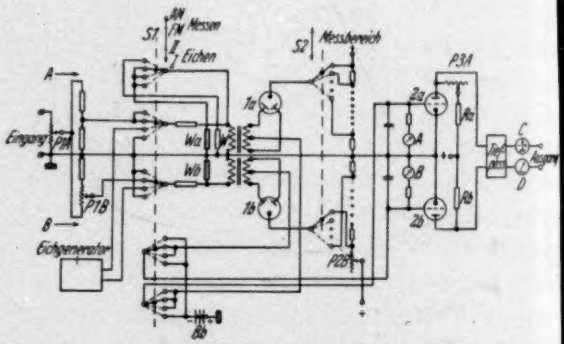



Abb. 4. Prinzipschaltung des Tonschwankungsmessers

Der Aufbau im allgemeinen ist in Übereinstimmung mit dem in Abb. 1 veranschaulichten Meßverfahren. Ein Bandpaß ist nicht als selbständiges Glied vorhanden, sondern dadurch erzeugt, daß die Koppelelemente im Leitungsweg geeignet bemessen wurden. $W_a$ und $W_b$ stellen die frequenzabhängigen Widerstände dar, durch die eine frequenzmodulierte Träger-

[8]) F. LAUTENSCHLAGER, Theoretische und experimentelle Untersuchungen an frequenz- und phasenmodulierten Schwingungen, Elektr. Nachr.-Techn. 11 (1934), S. 357—363.

[9]) H. SALINGER, Zur Theorie der Frequenzanalyse mittels Suchtons, Elektr. Nachr.-Techn. 6 (1929), S. 293—302.

frequenz so in zwei amplitudenmodulierte verwandelt wird, daß diese in den Wegen $A$ und $B$ in Gegentakt schwingen. Zur Messung einer Amplitudenmodulation wird $W_a$ durch einen frequenzunabhängigen Widerstand $W$ ersetzt und an die Stelle des ganzen Weges $B$ tritt eine feste Vorspannung $B_b$.

Neben den Widerständen $W_a$ und $W_b$ ist das wichtigste Glied der Anordnung die ausgangsseitige Brückenschaltung mit den Röhren *2a* und *2b* und den Widerständen *P3A*, $R_a$ einerseits und $R_b$ andererseits. Die Differenzspannung zwischen den Anoden wird über einen Tiefpaß, der die restlichen trägerfrequenten Spannungen unterdrückt, und zwei Kontrollinstrumenten $C$ und $D$ einem angeschlossenen Oszillographen zugeführt.

Die beiden Röhren der Brückenschaltung machen zwei Eichungen — die beiden einzigen — notwendig, durch die Differenzen zwischen den Röhren so eliminiert werden, wie es das Meßverfahren verlangt. Der Schalter *S 1*, durch den die Umschaltungen zwischen „Eichen" und „Messen" bewirkt werden, trennt in Stellung „Eichen I" die Brückenschaltung von der übrigen Schaltung ab und legt an die beiden Röhrengitter die feste Vorspannung der Batterie $B_b$, was durch die Gleichstrominstrumente $A$ und $B$ angezeigt wird. Die sich bei gleicher Gittervorspannung und gleicher Spannung der Anodenstromquelle bei gleichen Anodenwiderständen im allgemeinen ergebende Anodenspannungsdifferenz wird durch Veränderung des einen Anodenwiderstandes mittels *P 3 A* beseitigt. Instrument $C$ zeigt die entsprechende Stromlosigkeit des Oszillographen an.

Damit eine in Gleichtakt einfallende Amplitudenmodulationsspannung in der Brücke herausfällt, müssen gleiche Anodenspannungsschwankungen entstehen, was im allgemeinen nicht durch gleiche Gitterspannungsschwankungen bewirkt wird. Diese werden daher in geeignetem Maße verschieden groß gemacht. In Stellung „Eichen II" des Schalters *S 1* wird auf die Brückenschaltung aus einem Eichgenerator eine amplitudenmodulierte Trägerfrequenz gegeben, und zwar in solcher Stärke, daß durch die Instrumente $A$ und $B$ wieder zwei gleichgroße Gleichspannungen wie im Falle „Eichen I" angezeigt werden. Im Wege $B$ wird nun durch eine besondere Maßnahme der Modulationsgrad der Eichspannung in dem Maße verändert, daß die auf die beiden Gitter gelangenden Modulationsspannungen in einem solchen Verhältnis stehen, daß die Anodenspannungsschwankungen gleich groß werden. In diesem Falle wird durch Instrument $D$ kein Wechselstrom angezeigt.

Die Änderung des Modulationsgrades geschieht auf folgende Weise. Die Doppelweggleichrichter *1a* und *1b* erhalten aus später noch zu erläuternden Gründen eine Vorspannung bestimmter Polung, so daß eine Gleichrichtung nur in den Zeiten stattfindet, in denen die Momentanwerte der Wechselspannung die Gleichspannung überschreiten. Mittels dieser Vorspannung kann der Modulationsgrad in gewissen Grenzen beliebig geändert werden. Eine oberflächliche Betrachtung veranschaulicht dies in Abb. 5. Es ist angenommen, daß der gleichgerichtete Träger die Amplitude 1 besitzt und ein gewisser Modulationsgrad die Einhüllende $e$ ergibt. Das Amplitudenverhältnis $A_1/A_2$ ist ein Maß für die Größe der Modulation. Erteilen wir den Gleichrichtern nun eine gewisse Vorspannung, so daß sich nach der Gleichrichtung beispielsweise das oberhalb der gestrichelten Geraden $g$ liegende Bild ergibt, so erkennt man, daß das neue Amplitudenverhältnis $A_1'/A_2'$ bedeutend größer geworden ist.

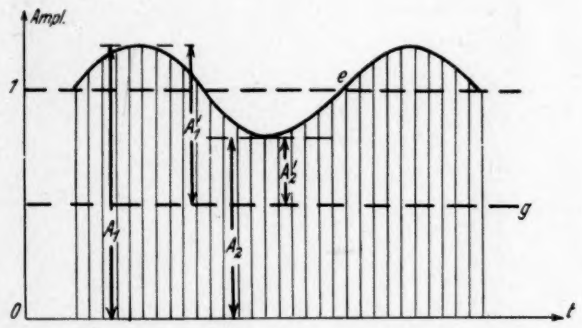



Abb. 5. Veränderung des Modulationsgrades bei der Demodulation durch Vorspannung des Gleichrichters

Zum Zwecke des wechselstrommäßigen Abgleichs der Brücke kann die Vorspannung des Gleichrichters *1b* (Abb. 4) durch den veränderlichen Widerstand *P 2 B* gegenüber der von *1a* verändert werden. Dadurch kann der Modulationsgrad im Wege *B* sowohl kleiner als größer als der im Wege *A* gemacht werden. Das Verhältnis wird so eingestellt, daß das Instrument *D* Stromlosigkeit anzeigt.

Das Eichverfahren besteht zusammenfassend einfach in folgendem. Bei „Eichen I" wird *P 3 A* so verändert, daß *C* Stromlosigkeit anzeigt; bei „Eichen II" wird *P 2 B* so verändert, daß *D* Stromlosigkeit anzeigt.

In den beiden Meß-Stellungen von *S 1*, und zwar *FM* = Frequenzmodulation und *AM* = Amplitudenmodulation, sind die Eichspannungen abgeschaltet und die zu messende Eingangsspannung gelangt auf die Brückenschaltung. Die Meßbereichumschaltung erfolgt lediglich durch stufenweise Umschaltung der Vorspannung für die Gleichrichter *1a* und *1b* mittels *S 2*. Der Sinn dieser Maßnahme wurde bereits besprochen. Bei dem größten meßbaren Modulationsgrad — etwa 3% Frequenzmodulation und 10% Amplitudenmodulation — ist die Vorspannung klein und die auf die Brücke gelangende Modulationsspannung ruft einen Ausgangsstrom bestimmter Größe hervor, der durch einen Oszillographen aufgezeichnet werden kann. Der gleiche Ausgangsstrom ergibt sich bei geringerem Modulationsgrad der Eingangsspannung, wenn mittels *S 2* eine entsprechend größere Vorspannung eingestellt wird, d. h. der Modulationsgrad um einen bestimmten Wert künstlich vergrößert ist. Die kleinsten einstellbaren Meßbereiche sind 1% Amplitudenmodulation und 0,3% Frequenzmodulation. Eine Reihe von Messungen in der Praxis auftretender Modulationen zeigten, daß die vorgesehenen Meßbereiche günstig gewählt sind.

Die frequenzabhängigen Widerstände $W_a$ und $W_b$ sind für alle Meßbereiche die gleichen. Der Umformungsfaktor wurde sehr gering etwa gleich zwei gewählt, da eine störende Amplitudenmodulation, selbst wenn sie 10mal größer als die durch Umformung erhaltene ist, in der Brücke mit ausreichender Genauigkeit kompensiert wird. Bei dem geringen Umformungsfaktor ist es möglich, die Widerstände $W_a$ und $W_b$ über einen großen Frequenzbereich linear auszubilden, so daß eine Ungenauigkeit der Trägerfrequenz um ± 10% zugelassen werden kann (2700 bis 3300 Hz) und außerdem noch im ungünstigsten Falle (bei 2700 und 3300 Hz) die Seitenfrequenzen bis zu ± 600 Hz ohne merklichen Fehler erfaßt werden. Beispielsweise gehen danach bei einer Modulationsfrequenz von 300 Hz noch mindestens zwei Seitenfrequenzpaare in die Messung ein. Die bisherigen Messungen haben aber gezeigt, daß mit einer oberhalb 400 Hz liegenden Modulationsfrequenz nicht zu rechnen ist, so daß in dieser Hinsicht ausreichend dimensioniert ist.

Wie bereits erwähnt, hat eine Ungenauigkeit der Trägerfrequenz Einfluß auf den Umwandlungsfaktor der frequenzabhängigen Widerstände. Abb. 6 zeigt eine Messung, die bestätigt, wie die angewendete Zweiwegschaltung Abweichungen vom Sollwert der Trägerfrequenz eliminiert.

Durch den Umformungsfaktor und die Gleichrichtervorspannungen sind die Meßbereiche eindeutig bestimmt. Da diese Größen unveränderlich sind, erübrigt sich eine Nachkontrolle der Empfindlichkeit.

Außer den in Abb. 4 angegebenen Schaltelementen sind noch solche vorhanden, die

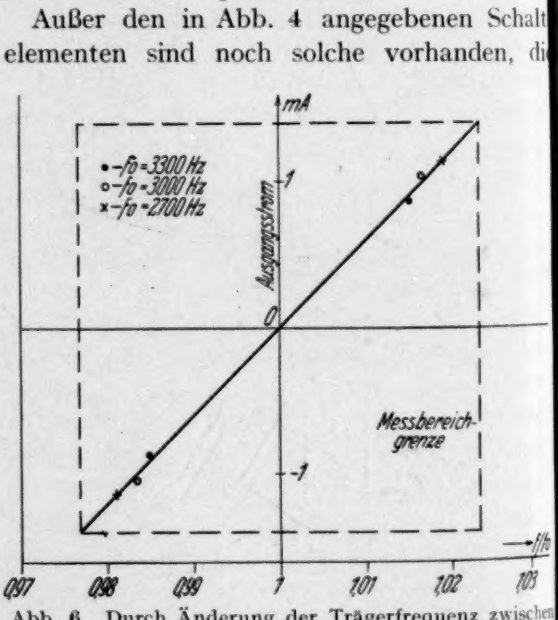



Abb. 6. Durch Änderung der Trägerfrequenz zwischen 2700 und 3300 Hz wird die Meßempfindlichkeit nicht geändert

in den Wegen *A* und *B* für genügende Verstärkung und günstige Anpassung der einzelnen Kreise sorgen. Die von einem normalen Tonabnehmer abgegebene Spannung reicht zum Betrieb des Gerätes aus. Die Stromversorgung geschieht restlos aus dem Wechselstromnetz, wobei die Elektrodenspannungen durch Glimmstrecken stabilisiert sind.

Eine Messung geht nun praktisch so vor sich. Das Gerät bedarf einiger Einbrennzeit, bis Röhren und Glimmstrecken einen stationären Zustand erreicht haben. Danach erübrigt sich jede Nacheichung. Befindet sich *S 1* in Stellung *FM*, so werden *P 1 A* und *P 1 B* so einreguliert, daß die Instrumente *A* und *B* die vorgeschriebenen gleichen Werte anzeigen. Sind Modulationen genügend tiefer Frequenz vorhanden, so schwingen *A* und *B* um ihren Sollwert, ebenso *C* um seine Nullstellung. *D* zeigt den fließenden Wechselstrom an und gibt Auskunft, ob der Meßbereich günstig gewählt wurde. Nach dieser einfachen Einstellung kann die oszillographische Aufnahme vor sich gehen. Am einfachsten sind die Messungen an Tonfilmwiedergabegeräten, vor allem, wenn mit einer nicht zu langen Meßfilmschleife gearbeitet wird. Es ist dann keine Schwankung der mittleren Amplitude zu erwarten, die die Einstellung der Instrumente *A* und *B* verändern würde. Bei der Schallplatte nimmt trotz konstanter Spannung am Schreiber die Amplitude von den äußeren Rillen nach den inneren zu monoton ab (um einige Prozent); dementsprechend sinkt der mittlere Ausschlag bei *A* und *B*. Es muß dann entweder bei *P 1 A* und *P 1 B* laufend nachreguliert werden, oder der geeignete Augenblick für die oszillographische Aufnahme abgewartet werden. Kritisch ist die Einhaltung des genauen Arbeitspunktes nicht. Die Abweichung vom Arbeitspunkt stört die wechselstrommäßige Symmetrie der Brücke (Elimination störender Amplitudenmodulation) in einem mit der Ungleichheit der Röhren *2a, 2b* zunehmenden Maße. Eine gleichstrommäßige Unsymmetrie bringt lediglich eine Verlagerung des oszillographischen Bildes.

Steht *S 1* auf *AM*, so zeigt Instrument *B* einen konstanten Wert an und *A* wird mittels *P 1 A* auf den Sollwert gebracht. Es gilt dann weiter das bereits oben Gesagte.

Wenn die oszillographischen Aufnahmen bei zwei Aufnahmegeschwindigkeiten gemacht werden, die sich etwa um den Faktor 10 unterscheiden, so gewinnt man, wie die Erfahrung lehrte, einen praktisch ausreichenden Einblick in die zu untersuchenden Schwankungserscheinungen. Man kann sogar sagen, daß die erhaltene Auskunft günstiger ist, als wenn etwa das erhaltene Frequenzgemisch durch Bandpässe in seine Komponenten zerlegt wird. Denn einmal stellt man oft fest, daß unperiodische Störungen von der gleichen Größe wie die periodischen sind; ferner kommt es praktisch in erster Linie auf die Hauptstörfrequenzen an, die in einem Oszillogramm leicht erkannt werden. Die Herstellung der Filter für die tiefen Frequenzen von wenigen Hz ist außerdem mit erheblichem Aufwand verbunden.

Eine Ausführungsform des Tonschwankungsmessers zeigt Abb. 7. Entlang des oberen Randes der Frontplatte sind die Röhren der Meßstromkreise und unten in der rechten Hälfte die Röhren des Netzanschlußteiles und des

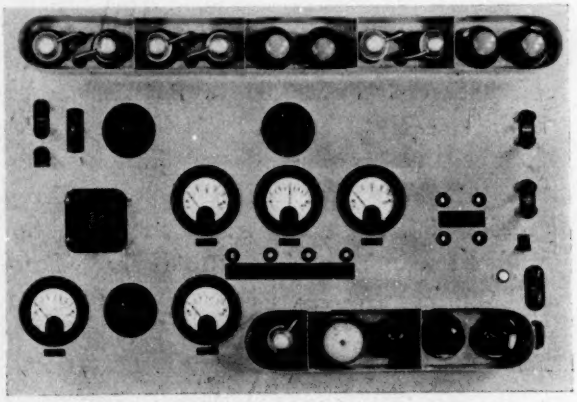


Abb. 7. Ansicht des Tonschwankungsmessers

Eichgenerators untergebracht. In der oberen Zeile unterhalb der Röhren folgen von links nach rechts aufeinander die Eingangsklemmen, ein Umschalter auf kleine oder große Eingangsspannung, der Schalter *S 1*, der Schalter *S 2* und Klemmen für das Wechselstrominstrument *D*; in der mittleren Zeile: die Eingangspotentiometer, die Instrumente *A*, *B*, *C* und

ganz rechts die Ausgangsklemmen zum Anschluß eines Oszillographen. Die übrigen Elemente dienen der Eichung und Kontrolle.

### 5. Messungen

Der Tonschwankungsmesser ist grundsätzlich überall da verwendbar, wo ein niederfrequenter Träger von 3000 Hz auf Amplituden- oder Frequenzmodulation hin untersucht werden soll. Solche Modulationen können als Mittel zur Anzeige mechanischer Vorgänge dienen. Beispielsweise läßt sich mit einem Maschinenteil, das auf mechanische Schwingungen hin untersucht werden soll, und einer festen Elektrode eine Kapazität bilden, die sich im Takt der Schwingungen ändert. Diese Kapazität ergibt in einen Generatorschwingungskreis oder einen an den Generator gelegten Spannungsteiler eingeschaltet eine Frequenz- oder Amplitudenmodulation, die mit dem Tonschwankungsmesser auf Frequenzen und ihre Amplituden hin untersucht wird.

Ein großes Anwendungsgebiet findet der Tonschwankungsmesser in der Elektroakustik bei der Untersuchung von Aufzeichnungs-, Umspiel- und Wiedergabemaschinen. Aufzeichnungsgeräte lassen sich prüfen durch Herstellung einer Aufnahme und deren Wiedergabe über ein Gerät mit vernachlässigbaren oder bekannten Störungen. Für feinere Untersuchungen von Plattenschneidgeräten wurde von KELLOGG und MORGAN [5]) ein anderer Weg eingeschlagen. Nach einem gut durchdachten Verfahren wurde ein „magnetisches Tonrad" hergestellt. Das ist eine mit höchster Präzision am Rande gezähnte, viellagige Kreisscheibe aus weichen Eisenblechen. Dieses Rad wird an Stelle einer Wachsplatte auf den Schneidteller gelegt und durch ein symmetrisch angeordnetes Spezialtonabnehmerpaar abgetastet. Es sollen dabei feinere Untersuchungen möglich sein, als über den Umweg Platte—Wiedergabegerät.

Die Prüfung einer Wiedergabemaschine erfolgt im allgemeinen durch Abspielen einer genügend fehlerfreien Aufzeichnung. Diese Meßaufzeichnung kann mittels eines guten Aufnahmegerätes oder nach einem Spezialverfahren hergestellt sein. Für Plattenspieler kann z. B. auch das magnetische Tonrad verwendet werden, wenn dessen Masse nicht stört. Bekannt ist auch die Verwendung einer Glasscheibe, deren Rand eine geschlossene photographische Aufzeichnungsspur trägt, die mittels Photozelle abgetastet wird. Der Herstellungsprozeß kann so geleitet werden, daß durch Mittelung einer mehrfach überlagerten Aufzeichnung eine Tonspur hoher Gleichförmigkeit entsteht. Entsprechend kann auch eine Meßfilmschleife hergestellt werden [4]).

Die Lokalisierung der gemessenen Störungen im Untersuchungsobjekt wird dadurch besonders einfach, daß man schon von vornherein auf Grund des Aufbaues der Maschine die möglichen Frequenzgrößen angeben kann. Hervorgerufen werden Modulationen u. a. durch Motore und Übersetzungen, die eine periodische Änderung der Winkelgeschwindigkeit von Wellen bewirken, ferner durch Exzentrizitäten. Es interessieren zunächst die Hauptstörungen, von denen im allgemeinen nur wenige vorhanden sind und deren Frequenzen im allgemeinen einen großen Abstand haben und in keinem ganzzahligen Verhältnis stehen. Deswegen liefert ein Oszillogramm schnell einen guten Einblick in die Störungen, vor allem wenn zwei Aufnahmen verschiedener Geschwindigkeit gemacht werden, so daß die Grob- und Feinstruktur der aufgezeichneten Schwingungen zutage kommt.

Zwischen den prozentualen Werten der Amplitudenmodulation einerseits und denen der Frequenzmodulation andererseits ist ohne weiteres kein Vergleich möglich, da die Maßstäbe unterschiedlicher Natur sind. Ist $\Delta f/f_m$ etwa $< 0{,}5$, so ist die Größe der Frequenzmodulation im wesentlichen durch das erste Seitenfrequenzpaar gegeben und ein Vergleich mit der Größe einer Amplitudenmodulation leicht möglich. Abb. 8 zeigt unter dieser Voraussetzung das Verhältnis der prozentualen Amplitudenmodulation zur prozentualen Frequenzmodulation; der Prozentsatz der ersten Modulationsart übertrifft den der zweiten weit.

Es seien zum Schluß einige charakteristische Meßergebnisse angeführt. Messung 1 (Abb. 9) zeigt als erstes zwei Kontrollmessungen, bei

denen aus einem Summer eine störungsfreie Frequenz von 3000 Hz auf den Tonschwankungsmesser gegeben wurde. Die auf den empfindlichsten Meßbereichen für Frequenz- und Amplitudenmodulation noch erkennbaren Störungen sind für praktische Messungen ohne Bedeutung. (Die Meßbereichsgrenzen sind durch die Randlinien der Oszillogramme festgelegt.)

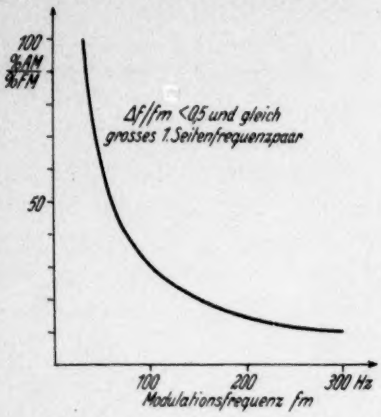



Abb. 8. Verhältnis zwischen prozentualer Amplitude und prozentualer Frequenzmodulation bei Voraussetzung eines gleich großen ersten Seitenfrequenzpaares ($\Delta f/f_m < 0{,}5$)

Oszillogramm 31 zeigt die Amplitudenmodulation von 50 Hz eines wechselstrombetriebenen Verstärkers mit direkt geheizten Endröhren. Der Modulationsgrad beträgt 0,32%.

Messung 2 (Abb. 10). Ein auf einer guten Tonkamera aufgenommenes Filmnegativ wurde auf einem zu untersuchenden Wiedergabegerät abgespielt. Oszillogramm 11 zeigt eben erkennbar eine langsame periodische Störung von 5 Hz, die sich in 12 in eine solche zu 96 Hz (Perforationsfrequenz) weiter auflöst. Die gesamte Modulation liegt unter 0,3%. Die Amplitudenmodulation ergibt 21 zu etwa 6% bei 3,63 Hz, was der Umdrehungsfrequenz der Tonrolle im Wiedergabegerät entspricht. Nach 22 sind auch 96 Hz schwach vertreten.

Messung 3 (Abb. 11) zeigt das Ergebnis der Untersuchung eines Plattenspielers mit Antrieb durch einen Sajamotor. Es wurde dazu eine

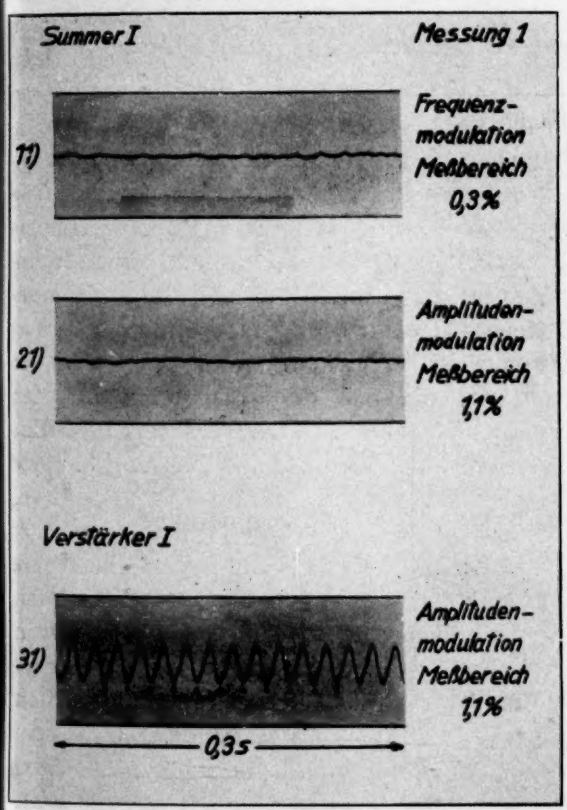



Abb. 9. Mit dem Tonschwankungsmesser erhaltene Oszillogramme: 11 und 21 Kontrollmessungen mit einem störungsfreien Summer; 31 Amplitudenmodulation eines Verstärkers

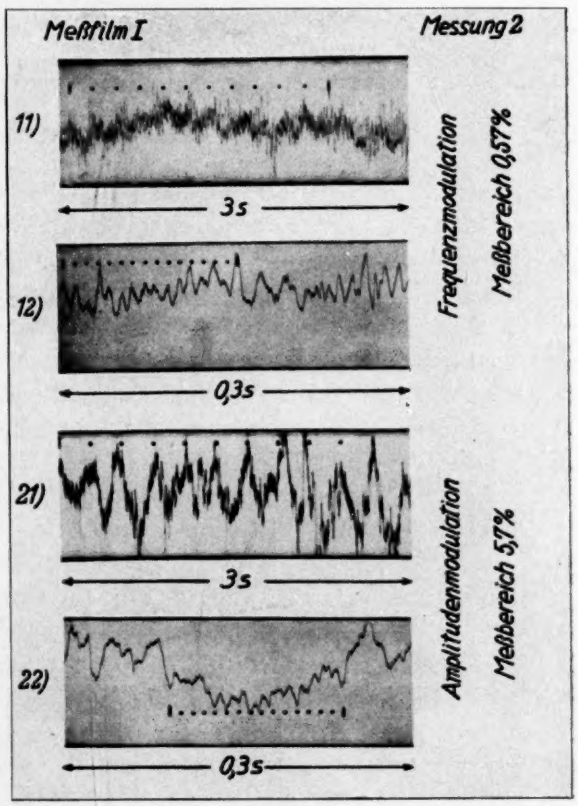



Abb. 10. Untersuchung eines Tonfilmwiedergabegerätes

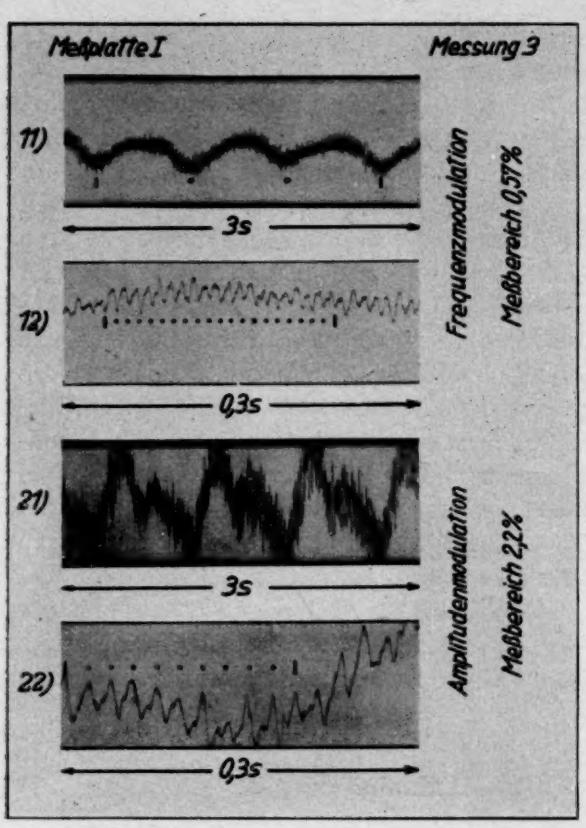



Abb. 11. Untersuchung eines 1. Plattenspielers

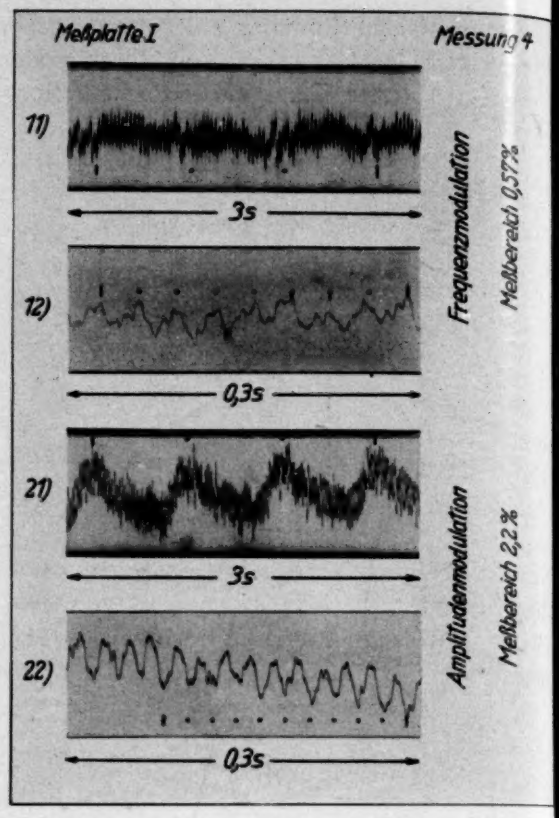



Abb. 12. Untersuchung eines 2. Plattenspielers

Meßplatte abgespielt, die bei der Herstellung durch den Aufnahmeverstärker eine Amplitudenmodulation von 50 Hz erhalten hatte, was in den Meßergebnissen zum Ausdruck kommt. Die Meßplatte wurde so auf den Plattenteller gelegt, daß der Tonabnehmer möglichst geringe radiale Schwankungen ausführte. Oszillogramm 11 zeigt die sich dann noch ergebende Frequenzmodulation der Umdrehungsfrequenz von 1,3 Hz. Entsprechend dem Antriebsverfahren mittels Sajamotor kommt in 12 eine Frequenz von 100 Hz zum Vorschein, bedingt durch die magnetischen Intensitätsschwankungen; Modulationsgrad etwa 0,07%. 21 zeigt entsprechend auch eine Amplitudenmodulation von 1,3 Hz. 22 bringt im wesentlichen die 50 Hz wieder, die bereits auf der Meßplatte vorhanden sind.

Messung 4 (Abb. 12) ist ähnlich 3, jedoch wurde die gleiche Meßplatte auf einem Plattenspieler untersucht, dessen Plattenteller durch einen hochtourigen Wechselstrommotor über eine Schneckenrad-Zahnrad-Übersetzung angetrieben wurde. 11 zeigt wieder die Umdrehungsfrequenz (1,3 Hz), während 12 die Zahnradübersetzung mit 31,8 Hz wiedergibt (Modulationsgrad etwa 0,16%). Weniger gut zu erkennen ist eine überlagerte Frequenz von 100 Hz, die auf den Wechselstromantrieb zurückzuführen ist. Die Amplitudenmodulation zeigt ein ähnliches Bild wie Messung 3.

### *Zusammenfassung*

Es wird über die Arbeitsweise eines Tonschwankungsmessers berichtet, der Amplitudenmodulationen von 0,03—10% und Frequenzmodulationen von 0,01 bis 3% zu messen gestattet. Die Amplitudenmodulation wird mittels Gleichrichtung gemessen. Die Messung der Frequenzmodulation erfolgt nach deren Umwandlung in eine Amplitudenmodulation. Einige charakterische Meßergebnisse werden angeführt. *(Eingegangen am 8. September 1938.)*

# Über die Abhängigkeit der Lautstärke des subjektiven Differenztones von der Frequenz der Primärtöne

Von Walter Kuhl

Mitteilung aus dem Institut für Schwachstromtechnik an der Technischen Hochschule Dresden

*(Mit 3 Textabbildungen)*

Nach einem kurzen Überblick über die bisherigen Veröffentlichungen über den subjektiven Differenzton wird in der vorliegenden Arbeit über Versuche berichtet, die Amplitude, vor allem aber die Lautstärke des Differenztones bei Primärtönen bis über 10000 Hz zu bestimmen. Außerdem wurden orientierende Messungen über die Stärke des Differenztones bei Knochenleitung gemacht.

## I. Die wichtigsten Arbeiten über den subjektiven Differenzton

Treffen zwei oder mehrere Sinustöne auf das Ohr auf, so sollte nach dem Ohmschen Gesetz der Akustik jedem nur eine Tonempfindung entsprechen. Infolge der Nichtlinearität des Ohres werden aber alle möglichen Kombinationstöne gebildet und von den Hörnerven wie die objektiven Töne empfunden. Da sie objektiv im Schallfeld nicht nachweisbar sind, werden sie als subjektive Töne bezeichnet. Neben den Primärtönen ist meistens nur der erste Differenzton aus dem entstehenden Tongemisch herauszuhören. Er wurde daher auch zuerst entdeckt, und zwar 1740 von dem Thüringer Organisten Georg Andreas Sorge, der ihn 1745 in einer Veröffentlichung erwähnte. Bekannter wurde er allerdings durch eine 1754 unabhängig davon erfolgende Veröffentlichung des italienischen Geigers Tartini.

Die subjektiven Obertöne und weitere Kombinationstöne wurden von Helmholtz[1]) entdeckt. Als Ursache für das Entstehen der Kombinationstöne nahm er eine Asymmetrie der Schwingungen des Trommelfells an, mehr aber noch das lose Hammer-Amboß-Gelenk.

Die erste umfassende qualitative Arbeit über die beim Auftreffen zweier lauter Sinustöne entstehenden Kombinationstöne stammt von C. Stumpf[2]). Er wies in dem Tongemisch bis zu 8 Kombinationstöne nach, von denen nur der erste Differenzton $(f_1 - f_2)$ und der zweite $(2f_2 - f_1)$ wesentliche Stärke haben, aber auch nur dann, wenn die Frequenz des Differenztones unterhalb der der Primärtöne liegt, und deren Intensitäten etwa gleich groß sind. Er gab an, daß die Lautstärke der Differenztöne mit steigender Schwingungszahl der Primärtöne zunimmt.

Wegel und Lane untersuchten in ihrer Arbeit über die Verdeckung zweier reiner Töne[3]), bei welchen Intensitäts- und Frequenzverhältnis der erste Differenzton bzw. die weiteren Kombinationstöne auftreten. In dem bei Primärtönen von 700 und 1000 Hz mit einer Lautstärke von 95 Phon auftretenden Tongemisch wurden nach der Methode des schwebenden Hilfstones 17 Kombinationstöne nachgewiesen. Wenn der Differenzton zwischen die Primärtöne fällt, ist er nicht hörbar, weil er von dem tieferen verdeckt wird.

Das Auftreten von Differenztönen bei einseitig belasteten Gummimembranen, magnetischen Telephonen und Kohlemikrophonen wurde von E. Waetzmann[4]) untersucht. Beim

[1]) Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen, 6. Aufl., 1913.

[2]) C. Stumpf, Z. Psychol. 55 (1910), S. 1.

[3]) Wegel und Lane, Physic. Rev. 23 (1924), S. 421.

[4]) E. Waetzmann, Ann. Physik 62 (1920), S. 371; Z. Physik 1 (1920), S. 271 u. 416; Physik. Z. 26 (1925), S. 744.

Auftreffen zweier Primärtöne verschiedener Frequenz, aber annähernd gleicher Amplitude findet infolge Bevorzugung einer Schwingungsrichtung eine Art Gleichrichtung statt, und damit tritt der Differenzton auf. Diese Erkenntnisse übertrug er auf das Ohr, wobei auch er als Sitz der Nichtlinearität das Gelenk Hammer-Amboß annahm.

W. JANOVSKY untersuchte in einer Arbeit über die Hörbarkeit von Verzerrungen[5]) auch die Hörbarkeit der subjektiven Kombinationstöne. Er wies nach, daß die Abhängigkeit der Hörbarkeit des ersten Differenztones von der Höhenlage, dem Frequenz- und Amplitudenverhältnis der Primärtöne ihre Erklärung in der Ohrempfindlichkeit und der Verdeckung durch die Primärtöne findet und daß keinerlei frequenzabhängige Verzerrung angenommen zu werden braucht.

Die grundlegenden Versuche über die Größe des ersten Differenztones und den Sitz der Nichtlinearität des Ohres wurden von G. v. BÉKÉSY[6]) gemacht. Er fand, daß für Primärtöne von 800—4000 Hz und Differenztöne von 200—800 Hz die Amplitude des Differenztones etwa 1,5% derjenigen der Primärtöne beträgt, unabhängig von Frequenz und Amplitude. Es wurde nachgewiesen, daß das Trommelfell den Differenzton nicht erzeugt, da es ihn in wesentlich geringerem Maße abstrahlt, als einen gleichwertigen objektiven Ton. Daß der Differenzton zum wesentlichen Teil im Mittelohr entsteht, wurde dadurch bewiesen, daß eine Verschiebung des Trommelfells und der Gehörknöchelchen durch Veränderung des Luftdrucks die Stärke des Differenztones erhöhte. BÉKÉSY nimmt an, daß der Differenzton bei den Schwingungen des Steigbügels entsteht, denn das Gelenk Hammer-Amboß ist nach neueren mikroskopischen Beobachtungen[7]) wahrscheinlich verwachsen.

Praktische Bedeutung hat der subjektive Differenzton für die Lautstärke des Grundtones von Sprachlauten und Klängen. Vor allem C. STUMPF[8]) wies darauf hin, daß der Grundton als subjektiver Differenzton aller benachbarten harmonischen Teiltöne zustande kommen oder verstärkt werden kann, zumal wenn er, wie bei der Sprachübertragung über eine Fernsprechleitung mit einer unteren Grenzfrequenz von 250 Hz, fast vollkommen unterdrückt wurde.

H. FLETCHER[9]) stellte bei natürlichen und synthetischen Klängen fest, daß man bei Lautstärken von 70—80 Phon den Grundton und bis zu 6 Harmonische aussieben kann, ohne daß neben der Klangfarbeänderung eine Änderung der Tonhöhe bemerkt würde.

Wesentlich wirksamer als durch den subjektiven Differenzton bildete K. O. SCHMIDT[10]) unterdrückte Sprachfrequenzen elektrisch wieder neu durch Einschalten eines nichtlinear verzerrenden Gliedes. Die besten Erfolge wurden bei der Neubildung des unterdrückten unteren Frequenzbereiches und geeignet bemessener Beimischung erzielt. Mit Rücksicht auf Einschwingvorgänge und Verwaschungen der Vokale kann man die Unterdrückung und Neubildung der Sprache etwa bis zu einer Grenze von 600 Hz vornehmen. Die Neubildung der Sprachfrequenzen unterhalb der Grenzfrequenz der Leitungen von 300 Hz würde keinen merkbaren Gewinn an Silbenverständlichkeit, wohl aber eine natürlichere Klangfarbe bringen.

## II. Messungen über die Frequenzabhängigkeit der Lautstärke des Differenztones

### *1. Fragestellung und Meßmethode*

Von G. v. BÉKÉSY ist für Primärtöne bis 4000 Hz festgestellt worden, daß die Amplitude des im Ohr entstehenden subjektiven Differenztones von der Frequenz der Primärtöne unabhängig ist und 1—1,5% ihrer Amplitude beträgt. Bei qualitativen Versuchen mit lauten hohen Tönen hat man aber den Eindruck, daß

[5]) W. JANOVSKY, Elektr. Nachr.-Techn. 6 (1929), S. 921.

[6]) G. v. BÉKÉSY, Ann. Physik 5. Folge 20 (1934), S. 809.

[7]) G. v. BÉKÉSY, Akust. Z. 1 (1936), S. 13.

[8]) C. STUMPF, Die Sprachlaute, Berlin 1926.

[9]) H. FLETCHER, Physic. Rev. 23 (1924), S. 427.

[10]) K. O. SCHMIDT, Telegr. u. Fernspr.-Techn. 22 (1933), S. 13.

die Lautstärke des Differenztones bzw. der tiefen Komponenten des durch die nichtlinearen Verzerrungen des Ohres entstehenden Tongemisches größer ist, als dieser Amplitude entspricht und mit zunehmender Frequenz der Primärtöne zunimmt, worauf schon C. STUMPF[11]) hinwies.

Als Differenzfrequenz wurde für alle Messungen 300 Hz gewählt. Dafür ist einerseits die Ohrempfindlichkeit und damit bei gegebener Amplitude die Lautstärke noch genügend groß, andererseits ist der Differenzton besser als bei höheren Frequenzen aus dem Tongemisch herauszuhören und in seiner Lautstärke gesondert zu beurteilen.

Die Amplitude des subjektiven Differenztones wurde durch Hinzugabe eines objektiven Vergleichstones annähernd gleicher Frequenz nach der etwas abgewandelten Methode der maximalen Schwebungen bestimmt. Statt bei einer Schwebungsfrequenz von einigen Hz maximale Schwebungen einzustellen, wurden Schwebungsperioden von etwa 10 sec Dauer gewählt und die Lautstärke des Vergleichstones solange verringert, bis er im Minimum nicht mehr hörbar war, den Differenzton also kompensierte. Öfteres Ein- und Ausschalten des Vergleichstones erleichterte die Einstellung.

Die Lautstärke des Differenztones wurde durch Vergleich mit einem objektiven Ton gleicher Frequenz bestimmt, der abwechselnd mit den Primärtönen eingeschaltet wurde. Die Beurteilung war dann einfacher, wenn ein Primärton dauernd eingeschaltet blieb, und der zweite abwechselnd mit dem Vergleichston eingeschaltet wurde.

Um den Lautstärkevergleich unvoreingenommen und mit einer Genauigkeit von 1 db durchführen zu können, wurden 9 verschiedene Lautstärkestufen des Vergleichstones in ungeordneter Reihenfolge je dreimal oder viermal dem Ohr des Beobachters dargeboten, und jeweils beurteilt, ob der Vergleichston lauter oder leiser als der Differenzton erschien. Dabei wurde vorher der Vergleichston für die mittlere Stufe flüchtig auf gleiche Lautstärke mit dem Differenzton eingestellt. Um keine Hilfsperson beim Versuch zu benötigen, waren die Abgriffe eines Spannungsteilers mehrmals in wahlloser Reihenfolge an die Segmente eines vielstufigen Schrittschaltwerkes angeschlossen, das nach jedem Vergleich weitergeschaltet wurde (Abb. 1).

In einem Diagramm wird über den einzelnen Lautstärkestufen aufgetragen, wie oft der Vergleichston mit dieser Lautstärke lauter als der Differenzton empfunden wurde. Die Stufe, die der Hälfte der Beobachtungen entspricht, stellt die tatsächliche Lautstärke dar. Der bei

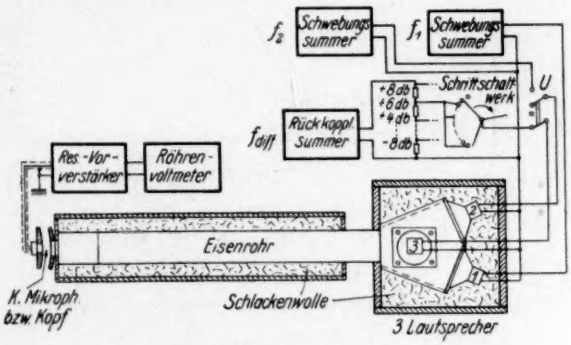



Abb. 1. Schema der Meßanordnung

einer beliebigen Stufe gemessene Schalldruck des Vergleichstones wird entsprechend umgerechnet.

Die geringsten wahrnehmbaren Lautstärkeunterschiede sind abhängig von der Frequenz und Lautstärke des Tones, außerdem von der Richtung der Änderung bei einmaligen und der Schnelligkeit der Änderung bei periodischen Lautstärkeänderungen. Sie sind für zweiohriges Hören geringer als für einohriges. Nach Messungen von B. G. CHURCHER[12]) beträgt die Lautstärkeunterschiedsempfindlichkeit bei einohrigem Hören und 800 Hz für die Zunahme bzw. Abnahme der Lautstärke 1,9 bzw. 2,5 db bei einer Lautstärke von 10 Phon und 1,5 bzw. 2,2 db bei 20 Phon. Bei 300 Hz muß man mit etwas größeren Werten rechnen. Die neun Lautstärkestufen wurden daher in Abständen von 2 db festgelegt.

Um die Stärke des Differenztones im Verhältnis zu der der Primärtöne angeben zu

[11]) C. STUMPF, Z. Psychol. 55 (1910), S. 1.

[12]) B. G. CHURCHER, Philos. Mag. 18 (1934), S. 927.

können, muß der Schalldruck des Vergleichstones auf den Schalldruck der Primärtöne am Ort der Nichtlinearität, nach den Versuchen von BÉKÉSY also im Mittelohr, zumindest aber am Trommelfell bezogen werden. Daher wurde versucht, wie später näher ausgeführt wird, den Schalldruck am Trommelfell zu bestimmen.

*2. Meßanordnung*

Als Schallgeber wurden drei dynamische Lautsprecher benutzt, die an einer Schallführung (Abb. 1) unter Zwischenlage dicker Filzstreifen befestigt wurden, um eine gegenseitige Beeinflussung durch Körperschall und die dabei mögliche Entstehung des Differenztones zu vermeiden. In der ganzen Schallführung wurden alle Spalte sorgfältig vermieden, da die dort auftretende akustische Gleichrichtung ebenfalls einen Differenzton erzeugen könnte. Der Raum zwischen der Schallführung und dem äußeren Kasten wurde mit Schlackenwolle ausgefüllt. Durch ein Rohr aus Eisenblech mit 11 cm lichter Weite wurde der Schall einem ebenfalls mit Schlackenwolle ausgekleideten Rohr von 1,20 m Länge zugeführt, dessen wirksame Dämpfungslänge durch Verschieben des Eisenrohres geändert werden konnte. Am Ende dieses Rohres war ein dem Kopf angepaßtes Formstück mit dünner Watteauflage angebracht, an das der Kopf bzw. zur Schalldruckmessung das Kondensatormikrophon in einer entsprechend geformten Scheibe gehalten wurde. Bei dieser Anordnung waren stehende Wellen nicht vermieden, sie beeinträchtigten jedoch die Messung des Schalldruckes nicht.

Zur Erzeugung der tonfrequenten Wechselspannungen wurden für die Primärtöne zwei Schwebungssummer mit Leistungsverstärkern benutzt, für den Vergleichston ein Rückkopplungssummer. Durch entsprechende Maßnahmen wurde vollständige Brummfreiheit erzielt.

Der akustische Klirrfaktor der gesamten Schallerzeugung wurde für das benutzte Frequenzgebiet bei mehreren Frequenzen so bestimmt, daß die Schalldrücke des Grundtones und des ersten Obertones, der allein nachweisbar war, am Ende des Dämpfungsrohres mittels des Kondensatormikrophones über ein Dritteloktavsieb (S & H, Rel Ms 2020a) getrennt gemessen wurden. Der Klirrfaktor betrug bei 50 $\mu$ bar 1,5%, für den bei den Versuchen fast ausschließlich benutzten Schalldruck von 2 $\mu$ bar lag er jedoch unter 0,1%.

Der Schalldruck wurde mittels eines Meßkondensatormikrophones von S & H in Verbindung mit einem zweistufigen Vorverstärker und einem Röhrenvoltmeter gemessen. Zur Messung kleinster Schalldrücke wurde der Vorverstärker mit einer Resonanzstufe benutzt, um unter den Störpegel, der durch das Röhrenrauschen, vor allem aber durch Bodenerschütterungen gegeben war, herunterzukommen. Dadurch konnten noch Schalldrücke von 0,001 $\mu$ bar gemessen werden. Zur Messung wurde dann eine Eichspannung, die über einen Kondensator von der Kapazität des Kondensatormikrophones an den Eingang des Vorverstärkers gelegt wurde, so eingeregelt, daß sie gleichen Aufschlag am Röhrenvoltmeter wie die vom Mikrophon erzeugte ergab.

Da die Stärke des im Ohr entstehenden Differenztones etwa 1% der Amplitude der Primärtöne beträgt, darf der in der Schallerzeugungsanlage auftretende Differenzton 0,1% nicht überschreiten, um die Messung nicht zu fälschen.

Zuerst wurde versucht, den Differenzton der Anlage mit Hilfe des Kondensatormikrophons über das obenerwähnte Dritteloktavsieb zu messen. Das Filter wurde zu dem Zweck zwischen den Vorverstärker und das Röhrenvoltmeter geschaltet. Entsprechende Messungen ergaben aber, daß beim Anlegen zweier Sinusspannungen der in Betracht kommenden Größe an das Gitter des Vorverstärkers ein Differenzton entsteht, der in der Größenordnung des in der Anlage zulässigen liegt.

Der Differenzton wurde deshalb subjektiv durch Lautstärkevergleich mit einem objektiven Ton bestimmt. Um die Primärtöne vom Ohr fernzuhalten, wurde ein akustisches Tiefpaßfilter benutzt. Für die tiefsten benutzten Primärtöne betrug dessen Dämpfung über 40 db.

Der so gemessene Differenzton der Anlage überschritt selbst bei größten Schalldrücken 0,1% nicht.

Bei seitlicher Anordnung des Kondensatormikrophones am Ende des Dämpfungsrohres wurde untersucht, in welchem Maß der Schalldruck am Ende des Rohres bei Abschluß durch den Kopf verschieden ist von dem, der bei Abschluß mit der zur Aufnahme des Mikrophons dienenden Platte herrscht. Die dabei sich ergebenden sehr starken Unterschiede konnten durch Verwendung einer aus Plastilin geformten künstlichen Ohrmuschel auf $\pm 50\%$ herabgesetzt werden. Ein weiterhin angebrachter künstlicher Gehörgang ermöglicht eine ungefähre Nachbildung bis 2,5 kHz. Darüber haben der Gehörgang und eine künstliche Nachbildung verschiedene Resonanzen. Außerdem ist die wechselnde Impedanz des Trommelfells von entscheidendem Einfluß.

Es wurde dann versucht, den Schalldruck am Trommelfell über eine vor das Mikrophon geschaltete, in den Gehörgang bis 3 mm vor das Trommelfell eingeführte Kanüle zu messen. Damit in der Kanüle keine Resonanzen auftreten, müßte der Ohmsche Anteil des Rohrwiderstandes groß gegen den Blindanteil sein. Der Wirkwiderstand der benutzten Kanüle ($l = 70{,}5$ mm; $d_i = 1{,}4$ mm) beträgt 140 Ohm. Der Blindwiderstand ist dem Betrag nach für alle Frequenzen, die weniger als 18% von einer Resonanzfrequenz abweichen, größer, bei geringen Abweichungen wesentlich größer als der Wirkwiderstand. Die infolgedessen sich stark ausbildenden Resonanzen ergeben den einen Vorteil, daß die Kanüle in den Durchlaßbereichen geringe Dämpfung hat. Die Dämpfung wurde so bestimmt, daß bei verschiedenen Frequenzen der Schalldruck in einer Schallkammer mittels des Mikrophones abwechselnd direkt bzw. unter Zwischenschaltung der Kanüle gemessen wurde. Durch eine weitere Messung wurde der Anteil des Schalles, der durch die Wandung von Kanüle und Mikrophon statt durch die Öffnung der Kanüle zum Mikrophon gelangt, bestimmt. Er war nur bis 3300 Hz und von 4400—5100 Hz zu vernachlässigen. Über die Kanüle war demnach in dem wegen der tiefsten Gehörgangresonanz und auch für die Messungen mit Knochenleitung am meisten interessierenden Frequenzbereich eine genaue Bestimmung des Schalldruckes am Trommelfell möglich. Wie dies auch für die höheren Frequenzen angenähert erreicht wurde, wird später ausgeführt.

Das Verhältnis des Schalldruckes am Trommelfell zu dem am Kondensatormikrophon in der Abschlußplatte des Dämpfungsrohres wurde bis 3000 Hz bestimmt und ergab genau den Verlauf, den Békésy für die Erhöhung des Schalldruckes am Trommelfell gegenüber dem am Kopf berechnet hat[13]).

### *3. Meßergebnisse*

Die Messungen des subjektiven Differenztones geschahen, soweit dies nicht besonders vermerkt wird, bei einem Schalldruck der beiden Primärtöne von 2 $\mu$ bar, gemessen am harten Abschluß des Rohres.

Die hier angegebenen Meßergebnisse wurden für das rechte Ohr gewonnen. Vergleichsmessungen mit dem linken Ohr ergaben etwas abweichende Werte, aber für die Amplitude und die Lautstärke die gleiche Abhängigkeit von der Frequenz der Primärtöne. Dasselbe gilt für andere Versuchspersonen. Um die Frequenzabhängigkeit festzustellen, genügt es also, die genauen Messungen über den ganzen Frequenzbereich von 2000—10000 Hz mit einem Ohr eines Beobachters zu machen, zumal die subjektiven Messungen nicht zuletzt durch die Auswertung der Lautstärkevergleichsmessungen ziemlich zeitraubend waren. Bei Primärtönen unterhalb 2000 Hz ist eine Beurteilung der Lautstärke des Differenztones gesondert von der der Primärtöne nicht möglich.

Für den Vergleichston von 300 Hz ist der Schalldruck am harten Rohrabschluß gleich dem am Trommelfell, nicht aber für die Primärtöne. Da der Prozentsatz des Differenztones auf den Schalldruck der Primärtöne am Rohrabschluß bezogen wurde, traten also starke Schwan-

[13]) G. v. Békésy, Ann. Physik 5. Folge 14 (1932), S. 51.

kungen in dem aufgenommenen Verlauf auf. Für Primärtöne von 2000 bzw. 2300 Hz und 2500 bzw. 2800 Hz konnte der Schalldruck am Trommelfell über die Kanüle bestimmt werden. Die Amplitude des Differenztones betrug dabei genau 1,25% derjenigen der Primärtöne. Für einige andere Frequenzen, bei denen nur eine geringe Erhöhung des Schalldruckes am Trommelfell eintritt, wurde fast derselbe Wert gemessen. Trotz der Schwankungen ging aus den Werten hervor, daß der Prozentsatz der Amplitude des Differenztones

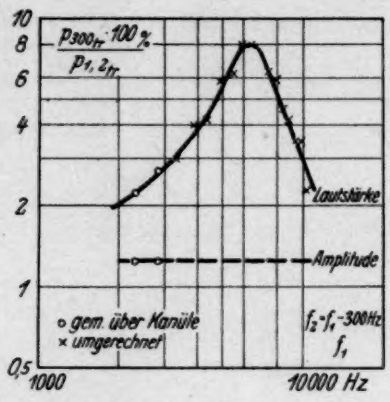



Abb. 2. Amplitude und Lautstärke des Differenztones in Abhängigkeit von der Frequenz der Primärtöne. (Über die Kanüle gemessene Amplitudenwerte als konstant angenommen)

bis über 10000 Hz konstant bleibt. Es ist also möglich, die Werte für die Einstellung auf gleiche Lautstärke entsprechend der Abweichung des unkorrigierten Wertes für die Amplitude von 1,25% umzurechnen. Die so erhaltenen Werte sind in Abb. 2 aufgetragen, dabei sind die über die Kanüle gemessenen besonders bezeichnet. Es ergibt sich ein eindeutiger Verlauf.

Bei tiefen und sehr hohen Primärtönen hat der Differenzton die Klangfarbe eines obertonarmen Tones. Die Lautstärke ist gleich der des Vergleichstones mit einem Schalldruck von etwa 2% desjenigen der Primärtöne. Bei Primärtönen mittlerer Frequenz ist die Lautstärke des Frequenztones dagegen beträchtlich größer. Bei 6000 Hz hat sie ein Maximum von etwa 8%. Das mit dem Differenzton als Einheit empfundene Gemisch der tiefen Kombinationstöne hat für diese Frequenzen eine scharfe, wenig harmonische Klangfarbe.

Bei Primärtönen von 6300 bzw. 6000 Hz wurde die Amplitude der weiteren unterhalb der Primärtöne liegenden Kombinationstöne kleiner Ordnung nach der Methode der maximalen Schwebungen bestimmt. Für 600 Hz ergab sich 0,16%, für 900 Hz 0,45%. Der Schalldruck am Mikrophon wurde für diese Frequenz gemäß den Berechnungen von G. v. BÉKÉSY[14]) auf den am Trommelfell umgerechnet. Ein Vergleichston von 300 Hz müßte etwa eine Größe von 0,32 bzw. 1,8% haben, um die gleiche Lautstärke zu ergeben. Die Amplitude des Kombinationstones $2f_2 - f_1$ bei 5700 Hz konnte nicht bestimmt werden, da der Prüfton von 5700 Hz mit dem tieferen Primärton einen Differenzton von 300 Hz ergibt, der mit dem ersten Differenzton Schwebungen bildet, so daß etwaige Schwebungen von 5700 Hz nicht gehört werden können.

Die Größe der obigen Kombinationstöne kann den maximalen Wert von 8% für die Lautstärke des mit dem Differenzton als Einheit empfundenen Gemisches der tiefen Kombinationstöne nicht ganz erklären. Die Steigerung der Lautstärke tritt dadurch ein, daß die teilweise Verdeckung der tiefen Kombinationstöne durch die Primärtöne mit einer Erhöhung von deren Frequenz aufhört. Der Abfall oberhalb von 7000 Hz läßt darauf schließen, daß im Gegensatz zur Konstanz des ersten Differenztones die Amplitude der übrigen Kombinationstöne bei weiterer Erhöhung der Primärtöne abnimmt.

Gleichfalls bei Primärtönen von 6000 und 6300 Hz wurde die Abhängigkeit der Lautstärke des Differenztones von dem Schalldruck der Primärtöne gemessen. Es ergab sich die in Abb. 3 aufgetragene Abhängigkeit. In dem untersuchten Bereich von 1—20 $\mu$ bar ist der Prozentsatz für die Lautstärke des Differenztones konstant, wie dies für die Amplitude von BÉKÉSY gemessen wurde.

Oberhalb von 11000 Hz wurde das Auftreten des Differenztones qualitativ untersucht. Bei

[14]) Siehe Anm. 13.

Primärtönen um 16000 Hz mit einem Schalldruck von etwa 1 $\mu$ bar war der Differenzton noch zu hören. Er verschwand mit dem Unhörbarwerden der Primärtöne bei 18000 Hz. Da eine Schalldruckmessung nicht mehr möglich ist, konnte nicht entschieden werden, ob es sich um eine Ohreigenschaft handelt, oder ob der Schalldruck der verwendeten Hochtonlautsprecher so klein wird, daß der Differenzton unter die Hörschwelle gelangt. Es ist aber anzunehmen, daß die Impedanz des Trommelfells bei Frequenzen um 18000 Hz so groß ist, daß

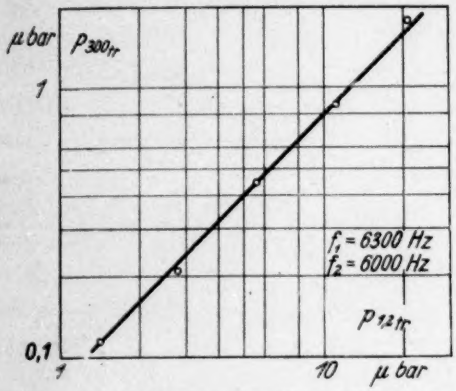



Abb. 3. Lautstärke des Differenztones in Abhängigkeit vom Schalldruck der Primärtöne

nur ein Bruchteil der äußeren Schallamplitude in das Mittelohr gelangt.

Es wurde schließlich eine orientierende Messung des Differenztones bei Zuführung des Schalles durch Knochenleitung gemacht.

Bei Versuchen mit Knochenleitung muß man vermeiden, den Gehörgang zu verstopfen, da dadurch für Frequenzen bis 2000 Hz eine Lautstärkevervielfachung bis zum Zehnfachen eintritt[15]), die oberhalb fortfällt, weil sich eine andere Schwingungsform der Knochen einstellt. Die Lautstärkeerhöhung kommt dadurch zustande, daß die Knochenschwingung auf den Unterkiefer übertragen wird, dessen Gelenk das im verstopften Gehörgang eingeschlossene Luftvolumen komprimiert. Die Leitung erfolgt dann wie bei einem Luftleitungston durch das Mittelohr, während sonst bei Knochenleitung die Erregung der Basilarmembran hauptsächlich durch direkte Kompression der Schnecke erfolgt.

Beim Versuch wurde das rechte Ohr an das Dämpfungsrohr und das linke dicht an die Öffnung eines mit Watte ausgefüllten Kastens gehalten. So wurde, ohne den Gehörgang verstopfen zu müssen, verhindert, daß Luftschall von den Knochenhörern in das Ohr gelangte. Als Knochenhörer wurden magnetische Lautsprechersysteme benutzt, die in einer linsenförmigen Druckfläche von 7 mm Durchmesser auf die Stirn aufgesetzt wurden.

Der Schalldruck des mit dem Differenzton auf gleiche Lautstärke eingestellten, auf ein Ohr wirkenden Vergleichstones wurde auf den Schalldruck eines Luftleitungstones bezogen, der die gleiche subjektive Lautstärke wie die durch Knochenleitung übertragenen Primärtöne hatte. Der Knochenleitungston wirkt auf beide Ohren, der Vergleichston nur auf ein Ohr. Deshalb konnte die Messung der Amplitude durch maximale Schwingungen nicht ausgeführt werden, sondern nur die Bestimmung der Lautstärke. Da die Lautstärke der auf beide Ohren wirkenden Primärtöne ebenfalls mit dem auf ein Ohr gegebenen Luftschall verglichen wurde, bleibt der richtige Prozentsatz gewahrt.

Bei Übertragung von 2300 Hz durch Luftleitung mit einem Schalldruck von 7,0 $\mu$ bar am Trommelfell und 2000 Hz mit der gleichen Lautstärke durch Knochenleitung ergab sich eine Lautstärke des Differenztones von 0,85%, die in derselben Größenordnung wie bei Luftleitung liegt.

Bei der Zuführung des Schalles beider Primärtöne durch Knochenleitung wurde qualitativ festgestellt, daß der Differenzton für Primärtöne über 2000 Hz nicht wahrnehmbar war oder gerade über der Hörschwelle lag, während er unterhalb dieser Frequenz dieselbe Größe wie bei der Zuführung nur eines Primärtones durch Knochenleitung hatte. Die Werte, die für Primärtöne gemessen wurden, deren Frequenzen an der Grenze liegen, veranschaulichen das. Für 2100 bzw. 2400 Hz lag die Lautstärke unter 0,1%, während sie für 1800 und 2100 Hz 0,5% betrug.

[15]) G. v. Békésy, Ann. Physik 5. Folge 13 (1932), S. 111.

Da bei der Zuführung zweier Primärtöne durch Knochenleitung bei offenem Gehörgang ein Differenzton auftritt, vor allem aber da der Sprung in der Stärke bei derselben Frequenz erfolgt, bei der die Erhöhung der Lautstärke durch Verstopfen des Gehörganges aufhört, erscheint die Annahme berechtigt, daß bei Knochenleitung auch bei offenem Gehörgang nicht der ganze Schnell durch Kompression der Schnecke, sondern zum Teil durch das Mittelohr dem inneren Ohr zugeführt wird.

*Zusammenfassung*

Bei den Versuchen, über die berichtet wird, wurde festgestellt, daß die Amplitude des subjektiven Differenztones bis über 10000 Hz unabhängig von der Frequenz der Primärtöne ist, die Lautstärke aber mit zunehmender Frequenz bis zu einem maximalen Wert bei 6000 Hz ansteigt, um dann wieder abzufallen. Der Prozentsatz für die Lautstärke ist unabhängig von der Amplitude der Primärtöne.

Bei Zuführung des Schalles durch Knochenleitung ist die Stärke des Differenztones bis 2000 Hz nur wenig geringer als bei Luftleitung, darüber ist der Differenzton kaum wahrnehmbar. Daraus wird ein Schluß auf die Erregung des Innenrohres bei Knochenleitung gezogen.

Herrn Professor H. BARKHAUSEN möchte ich herzlichst für das fördernde Interesse an dieser Arbeit danken. Gleichfalls danke ich Herrn Dr. W. JANOVSKY, Berlin-Wilmersdorf, für die Anregung zu der Arbeit und wertvollen Ratschläge zu ihrer Durchführung.

*(Eingegangen am 20. September 1938.)*

# Schluckgradvergleichsmessungen

Im Auftrag des Deutschen Akustischen Ausschusses

Zusammengestellt von Erwin Meyer u. Arnold Schoch

*(Mit 22 Abbildungen)*

## I. Einleitung

Zur Messung des Schallschluckgrads von Stoffen wird am häufigsten das Nachhallverfahren angewandt. Da man Schluckgradwerte fast nur in der Raumakustik braucht, kommt diesem Verfahren auch eine besondere Bedeutung zu. Nun ist schon lange bekannt, daß das Nachhallverfahren bei verschiedenen Laboratorien für denselben Schluckstoff oft erheblich verschiedene Ergebnisse liefert. Um die Größe der Abweichungen festzustellen, möglichst ihre Ursachen zu klären, und Unterlagen für eine etwa nötige Meßnorm zu gewinnen, stellten daher auf Veranlassung des Deutschen Akustischen Ausschusses folgende Laboratorien an einem bestimmten Schluckstoff Messungen zu Vergleichszwecken an:

1. Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt Berlin-Adlershof (DVL.);
2. Institut für Schwingungsforschung an der Technischen Hochschule Berlin (IFS.);
3. Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR.);
4. Generaldirektion PTT. Bern (PTT.);
5. Reichssender Wien (RAVAG.);
6. Reichs-Rundfunk-Gesellschaft Berlin (RRG.);
7. Akustisches Laboratorium der Technischen Hochschule Braunschweig (TH. Brschw.);
8. Institut für technische Physik der Technischen Hochschule Stuttgart (TH. Stgt.).

(In Klammern stehen die im folgenden zur Bezeichnung der Laboratorien benützten Abkürzungen.)

## II. Prüfstoff

Als Prüfstoff bekam jedes Laboratorium 20 m² Dyckerhoff-Akustik-Platten (gipsgebundene Holzfaser, Plattengröße $50 \cdot 50 \cdot 2{,}5$ cm³). Sie wurden von den Torfoleum-Werken E. Dyckerhoff, Poggenhagen (Hannover), freundlicherweise kostenlos zur Verfügung gestellt.

Um gleiche durchschnittliche Beschaffenheit der Prüfplatten der Institute sicherzustellen, wurden im Fabrikationsgang aufeinander folgende Platten verschiedenen Instituten zugewiesen. Die Prüfstoffe wurden auf dem Boden oder einer Wand ausgelegt. Einige Laboratorien haben auch Messungen mit auf drei nicht parallele Wände verteiltem Prüfstoff gemacht.

## III. Meßverfahren

### 1. Nachhallverfahren

Dieses Verfahren wurde von fast allen Laboratorien (ausgenommen DVL.) angewandt. Seine Anwendung setzt voraus, daß der Zusammenhang zwischen der Nachhallzeit eines Raums und den Schluckgraden seiner Wandflächen bekannt ist. Diesen Zusammenhang entnimmt man einer der Nachhalltheorien. Sie fußen alle auf idealisierten Voraussetzungen und können daher nur beschränkt richtig sein. Bei den Vergleichsmessungen wurde von den meisten Laboratorien die Sabine-Jägersche Nachhallformel zugrunde gelegt. Dann gilt für die Nachhallmessung mit Prüfstoff:

$$\frac{KV}{T} = a_p F_p + \Sigma a_i F_i$$

($K = 0{,}162$ m$^{-1}$s, $a_p$ Schluckgrad der Prüffläche $F_p$, $a_i$ Schluckgrade der übrigen Oberflächen-

stücke $F_i$). Für die Messung ohne Prüfstoff:

$$\frac{KV}{T_0} = a_{p_0} F_p + \Sigma a_i F_i$$

($a_{p_0}$ Schluckgrad der sonst vom Prüfstoff bedeckten Fläche). Die Elimination von $\Sigma a_i F_i$ und Berechnung von $a_p$ aus diesen Gleichungen erfordert eine Annahme über $a_{p_0}$. Zwei einfache Annahmen sind möglich: 1. Die Oberfläche $F$ des leeren Raums hat überall denselben Schluckgrad $a_{p_0}$. Dann ergibt sich

$$a_p = \frac{1}{F_p}\left(\frac{KV}{T} - \frac{KV}{T_0}\,\frac{F-F_p}{F}\right).$$

2. $a_{p_0} F_p$ ist vernachlässigbar klein gegen $\Sigma a_i F_i$. Dann folgt

$$a_p = \frac{1}{F_p}\left(\frac{KV}{T} - \frac{KV}{T_0}\right).$$

Zur Begründung der Annahme 2. kann man anführen, daß der Hauptanteil der Schallschluckung im leeren Raum kaum den glatten Wandteilen, die mit Prüfstoff belegt werden, zuzuschreiben ist, sondern den vorhandenen Einbauten. Der Auswertung der Vergleichsmessungen wurde teils die erste, teils die zweite Annahme zugrunde gelegt. Die Wahrheit liegt zwischen den beiden Annahmen. Die Unterschiede sind aber unter den praktisch meist vorliegenden Verhältnissen gering.

Eine Stelle (RAVAG.) legte die Eyringsche Nachhallformel zugrunde. $a_p$ bestimmt sich dann aus den Gleichungen:

$$\frac{KV}{T} = -F \lg\left(1 - \frac{a_p F_p + \Sigma a_i F_i}{F}\right),$$

$$\frac{KV}{T_0} = -F \lg\left(1 - \frac{a_{p_0} F_p + \Sigma a_i F_i}{F}\right).$$

Mit der Annahme 1. über $a_{p_0}$ folgt hieraus

$$a_p = \frac{1}{F_p}\left(\frac{F-F_p}{F}\, e^{-\frac{KV}{FT_0}} - e^{-\frac{KV}{FT}} + \frac{F_p}{F}\right).$$

Eine Umrechnung der von der RAVAG. nach dieser Formel berechneten Schluckgrade auf die der Sabine-Jägerschen Formel entsprechenden ergab Unterschiede, die nie größer als 0,01 waren. (Das rührt einfach daher, daß bei dem großen Hallraum der RAVAG. der mittlere Schluckgrad so klein blieb, daß $-\lg(1-a)$ ohne größeren Fehler durch $a$ zu ersetzen war.) Diese Unterschiede sind im Rahmen der üblichen Fehler vernachlässigbar, so daß die Ergebnisse der RAVAG. ohne weiteres mit denen der übrigen Laboratorien verglichen werden können.

Benützte Hallräume, Schallarten und Nachhallmeßgeräte:

| Lab. | Raumform | Vol. m³ | Oberfläche m² | Schallart | Nachhallmeßgerät |
|---|---|---|---|---|---|
| PTT | Quader | 40 | 74 | Heulton Schuß | ungerichtetes dynam. Mikrophon, Neumann-Pegelschreiber |
| RRG | „ | 72 | | Heulton Schuß | ungerichtetes Kondensator-Mikrophon, Neumann-Pegelschreiber |
| PTR | „ | 83 | | Heulton | Kondensator-Mikrophon, Neumann-Pegelschreiber |
| TH Br. I | „ | 112 | 143 | Heulton Schuß | Kondensator-Mikrophon, logarithm. Schreiber nach Holle und Lübcke Zs. Hftech. 48 (1936) 41 |
| IFS | „ | 157 | 184 | Heulton | ungerichtetes Kondensator-Mikrophon, logarithm. Schreiber nach Meyer und Keidel ENT 12 (1935) 37 |
| TH Br. II | „ | 162 | 184 | siehe TH Brschw. I | |
| TH St. | „ | 275 | 268 | Heulton | Bändchen-Mikrophon, Neumann-Pegelschreiber |
| RAVAG | schiefwinklig | 314 | 300 | Heulton | dynamisches Mikrophon, Siemens-Nachhallmesser u. Neumann-Pegelschreiber |

Das Schluckvermögen der leeren Hallräume (in m² äquivalenter offener Fensterfläche) ist in Abb. 1 aufgezeichnet.

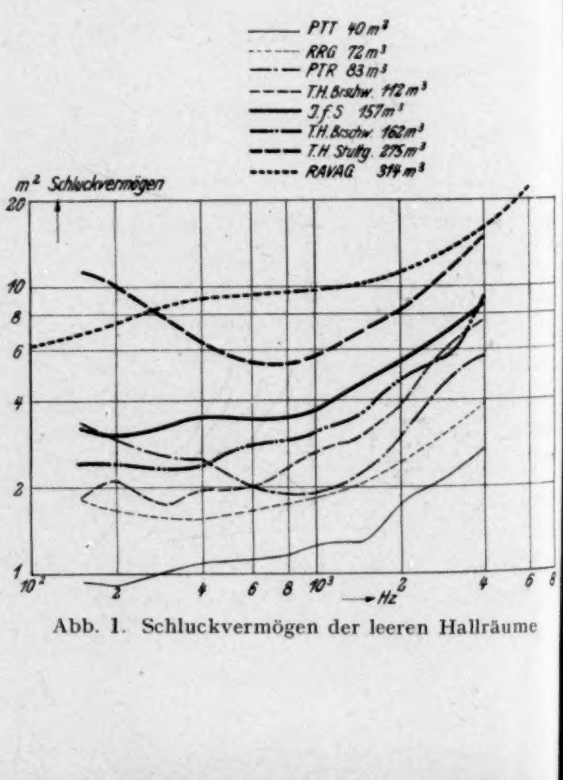



Abb. 1. Schluckvermögen der leeren Hallräume

Grundsätzlich können folgende Fehler Abweichungen der Meßergebnisse verschiedener Laboratorien verursachen:

*a) zufällige Fehler:*

1. Abhängigkeit der Nachhallzeit von Mikrophonstellung, Lautsprecherstellung, Schallspektrum (Art des Heultons) und kleinen Abweichungen der Schwerpunktfrequenz vom Sollwert.
2. Unsicherheit im Durchlegen mittlerer Geraden durch die meist etwas unregelmäßigen Nachhallkurven.

*b) triviale systematische Fehler:*

3. Verschiedene Beschaffenheit der Prüfstoffe (dieser Fehler dürfte bei den Vergleichsmessungen ausscheiden, s. unter Prüfstoff).
4. Unrichtige Aufzeichnung des Nachhallvorgangs (nichtlogarithmische Kennlinie, falsche Eichung, falsche Zeitskala).
5. Unrichtige Frequenzmessung (besonders bei Schußmessungen besteht diese Möglichkeit, da es nicht leicht ist, den Schwerpunkt des ausgesiebten Schallspektrums festzustellen).

*c) im Verfahren begründete systematische Fehler:*

6. Einflüsse, denen die Nachhallformeln falsch oder gar nicht Rechnung tragen (Raumgröße, Raumform, Prüffläche, Anordnung des Prüfstoffs).

Beim Vergleich von Schluckgradwerten, die nach dem Nachhallverfahren gewonnen worden sind, mit Werten, die nach einem direkten Reflexionsverfahren gemessen sind, erhebt sich außerdem die Frage, ob erstere auch der absoluten Bedeutung nach der üblichen Definition des Schluckgrads, wie ihn ein direktes Reflexionsverfahren ergibt, entsprechen. Diese nachhalltheoretische Frage läßt sich vorläufig nicht entscheiden. Auch wenn das Nachhallverfahren zwar nicht den Schluckgrad der üblichen Definition nach ergeben würde, aber doch wenigstens eine von Raumform usw. unabhängige Materialkonstante, die die Schluckfähigkeit kennzeichnet, wäre das Verfahren noch befriedigend. Denn für die raumakustische Anwendung des Schluckgrads würde dies genügen.

2. Direktes Reflexionsverfahren, beruhend auf der Ausmessung stehender Wellen vor der Prüfwand. Dieses Verfahren wurde von der DVL. angewandt. Eine ebene Schallwelle in einem Rohr fällt senkrecht auf die Prüfwand. Vor der Prüfwand bilden sich dann stehende Wellen und die Schalldruckamplitude schwankt räumlich zwischen Größtwerten $p_{max} = p_e + p_r$ und Kleinstwerten $p_{min} = p_e - p_r$ ($p_e$ Schalldruckamplitude der einfallenden Welle, $p_r$ Schalldruckamplitude der reflektierten Welle). Aus diesen Werten berechnet sich der Schluckgrad zu

$$a = 1 - \left(\frac{p_{max} - p_{min}}{p_{max} + p_{min}}\right)^2.$$

3. Direktes Reflexionsverfahren, beruhend auf der Trennung von einfallender und reflektierter Schallwelle. Dieses Verfahren wurde im Institut für Schwingungsforschung angewandt, um die wahren Schluckgrade des Prüfstoffs zum Vergleich mit den Ergebnissen der Nachhallmessungen zu erhalten. Der einfallende Schall trifft auf die Prüffläche schief auf. Der reflektierte Schall wird von einem auf den Druckgradienten ansprechenden Mikrophon aufgenommen, das so orientiert ist, daß es auf den direkten Schall nicht anspricht. Das Anzeigeinstrument ergibt so als Maß für den reflektierten Schall den Ausschlag $A_1$. Hierauf wird die Prüffläche durch eine vollkommen reflektierende Fläche ersetzt, und es ergibt sich ein Ausschlag $A_2$. Daraus folgt der Schluckgrad zu

$$a = 1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}.$$

Die Messungen wurden zur Vermeidung störender Reflexionen im Freien auf dem Dach gemacht. Die Prüfplatten wurden auf eine $1{,}5 \cdot 3$ m² große, 2,5 cm starke Sperrholzplatte genagelt. Die Platte stand senkrecht auf dem Boden; ihre nicht mit Schluckstoff bedeckte Seite war lackiert und wurde als vollkommen reflektierende Fläche benützt. Die Platte war drehbar gelagert, so daß ihre beiden Seiten

rasch vertauscht und unmittelbar nacheinander gemessen werden konnten. Lautsprecher und NEUMANNsches Kondensator-Mikrophon mit achtförmiger Charakteristik befanden sich unmittelbar am Boden in 5 bis 9 m Abstand von der Platte, je nach Einfallswinkel. Mit Hilfe von Schallimpulsen und Oszillograph wurde jeweils die richtige Mikrophonorientierung eingestellt und außerdem geprüft, ob nicht zuviel Störschall vorhanden war. Die Messung selbst wurde mit Heultönen ausgeführt, um Interferenzen des zu messenden Schalls mit Störschall auszugleichen. Um Schwankungen durch Wind ausmitteln zu können, wurden die Ausschläge über längere Zeiten registriert.

Die Messungen waren beschränkt auf den Frequenzbereich von 800 bis 3000 Hz; nach unten dadurch, daß sich keine Impulse mehr erzeugen ließen, die genügend kurz und damit brauchbar waren, um die richtige Arbeitsweise der Meßanordnung zu kontrollieren; nach oben durch die unzureichende Richtwirkung des Mikrophons. Der Bereich der Einfallswinkel war beschränkt auf 15 bis 45°, nämlich durch die unzureichende Richtwirkung des Mikrophons nach kleinen, durch die geringe Ausdehnung der reflektierenden Fläche nach großen Winkeln hin. Fehler durch unvollkommene Reflexion der glatten Vergleichsfläche dürften im Rahmen der übrigen Unsicherheiten vernachlässigbar sein.

## IV. Ergebnisse

### 1. Wahre Werte des Schluckgrads

Darunter seien die Werte verstanden, die nach den direkten Reflexionsverfahren gemessen sind. Sie sind in Abb. 2 in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt. Die Messungen der DVL. sind bei senkrechtem Schalleinfall gemacht; bei schiefem Schalleinfall wären größere Schluckgrade zu erwarten. Dies ist zu beachten beim Vergleich mit den Ergebnissen der Messungen nach dem Nachhallverfahren.

Der Schluckgrad des geprüften Stoffs zeigt einen starken Anstieg mit der Frequenz zwischen 100 und 800 Hz. Bei Frequenzen über 800 Hz ist der Schluckgrad ungefähr konstant und beträgt im Mittel 0,73.

### 2. Ergebnisse der Messungen nach dem Nachhallverfahren

Die Meßergebnisse der verschiedenen Laboratorien zeigen qualitative Übereinstimmung im Frequenzgang. Quantitativ bestehen aber erhebliche Abweichungen. Die Meßwerte sind

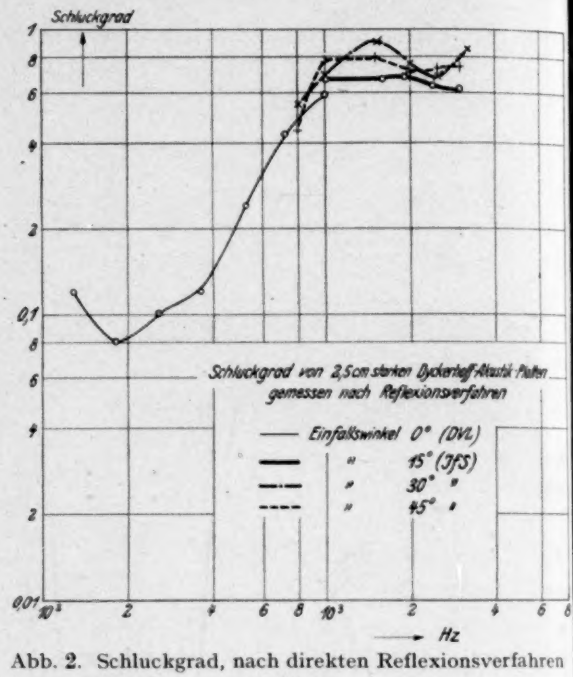



Abb. 2. Schluckgrad, nach direkten Reflexionsverfahren gemessen

abhängig von der benutzten Prüffläche, von der Anordnung des Prüfstoffs (in einer Fläche ausgelegt oder auf drei Wände verteilt) und vom benutzten Raum. Die Abweichungen sind besonders im Gebiet der hohen Frequenzen über 800 Hz ausgeprägt. Die Abweichungen bei den tiefen Frequenzen (unter 250 Hz) kann man wegen geringer Meßgenauigkeit außer Betracht lassen.

Um festzustellen, ob die Abhängigkeit der Meßwerte von der Prüffläche systematisch mit bestimmten Eigenschaften der Hallräume (Raumgröße, Schluckvermögen des leeren Raums) zusammenhängt, wurde der Mittelwert des Schluckgrads im Bereich der hohen Frequenzen 800 bis 4000 Hz planimetrisch bestimmt und gegen die Prüffläche aufgetragen

(Abb. 3). Dabei wurden die Meßwerte benutzt, die für in einer Fläche ausgelegten Prüfstoff mit Heultönen ermittelt wurden. Man sieht: Nur die Tendenz der Flächenabhängigkeit ist

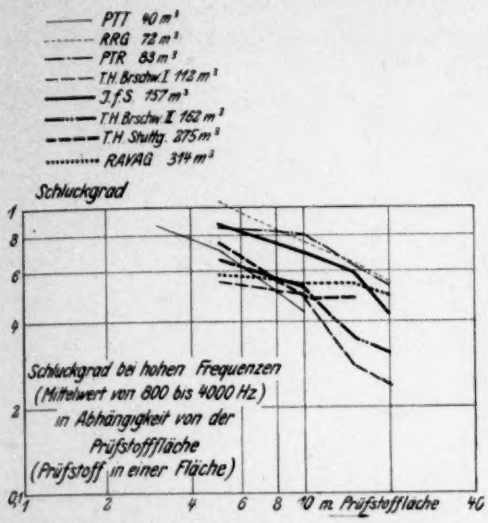



Abb. 3. Mittlerer Schluckgrad bei hohen Frequenzen in Abhängigkeit von der Prüfstofffläche

bei allen Räumen gleich, der Schluckgrad nimmt mit wachsender Prüffläche ab[1]). Im übrigen ist kein systematischer Zusammenhang der Höhenlage oder der Neigung der Kurven mit bestimmten Raumeigenschaften zu erkennen. Bemerkenswert ist, daß die Werte der RAVAG. eine verhältnismäßig geringe Flächenabhängigkeit zeigen; vielleicht hängt das damit zusammen, daß der benutzte Hallraum erstens ziemlich groß und zweitens schiefwinklig ist.

In Abb. 4 bis 7 sind die Schluckgrad-Frequenz-Kurven zusammengestellt, bei deren Messung der Prüfstoff in einer Fläche ausgelegt war und Heultöne benutzt wurden, und zwar nach Prüfflächen geordnet. So zeigt sich besonders deutlich die Größe der Abweichungen. Die Abweichungen sind nicht völlig unregelmäßig, vielmehr haben die zu den einzelnen Hallräumen gehörigen Kurven immer etwa dieselben relativen Lagen. Ein Zusammenhang mit bestimmten Raumeigenschaften ist aber nicht ohne weiteres zu erkennen. Dasselbe gilt für die

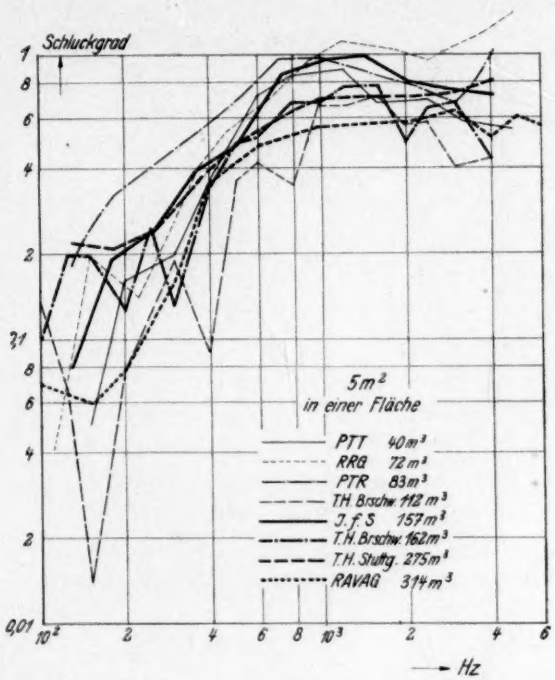



Abb. 4. Meßergebnisse bei 5 m² Prüfstoff in einer Fläche; Heultöne

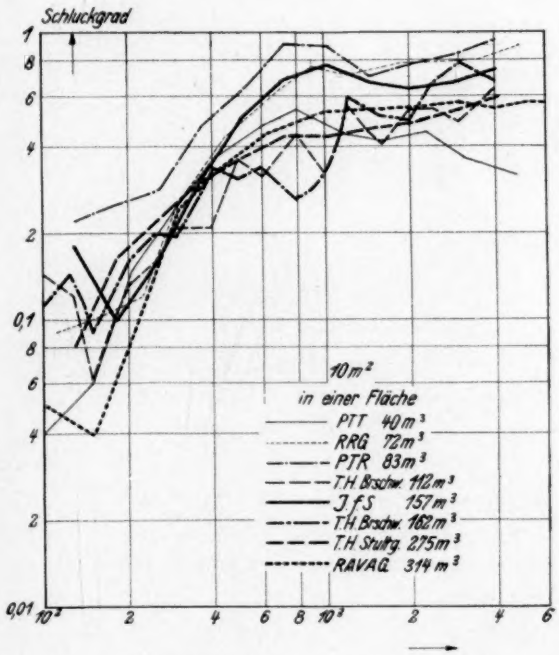



Abb. 5. Meßergebnisse bei 10 m² Prüfstoff in einer Fläche; Heultöne

[1]) Vgl. auch amerikanische Vergleichsmessungen J. Acous. Soc. Am. 6 (1935) 239 und 9 (1938) 234. Die Abnahme des Schluckgrads mit wachsender Prüffläche rührt zum Teil davon her, daß die Nachhallzeit einem Grenzwert zustrebt, wenn man eine Fläche immer mehr bedeckt, vgl. E. Meyer Akust. Z. 2 (1937) 179.

Schluckgradkurven, die durch Schußmessungen bestimmt wurden (Abb. 8 und 9). Die durch Schußmessungen ermittelten Werte sind übrigens meist niedriger als die durch Heultonmessungen bestimmten.

Günstiger werden die Verhältnisse, wenn der Prüfstoff auf drei aufeinander senkrechte Wände verteilt wird (Abb. 10 bis 13, Heultonmessungen). Die Abnahme der Meßwerte mit wachsender Prüffläche ist dann nicht mehr

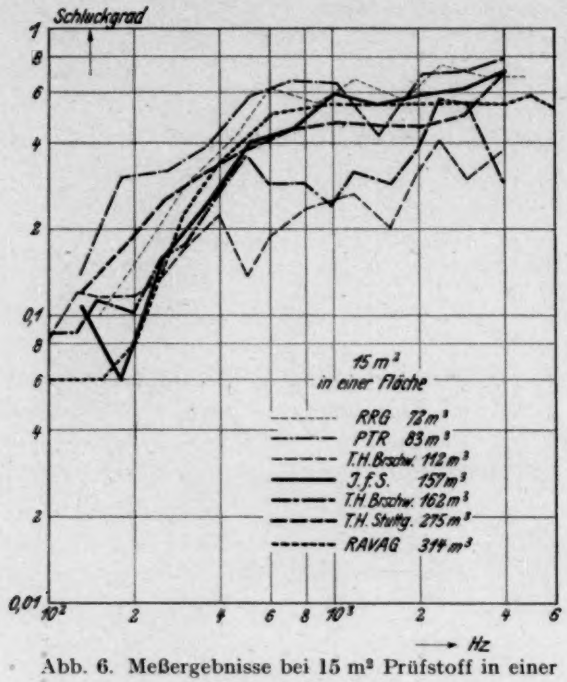



Abb. 6. Meßergebnisse bei 15 m² Prüfstoff in einer Fläche; Heultöne

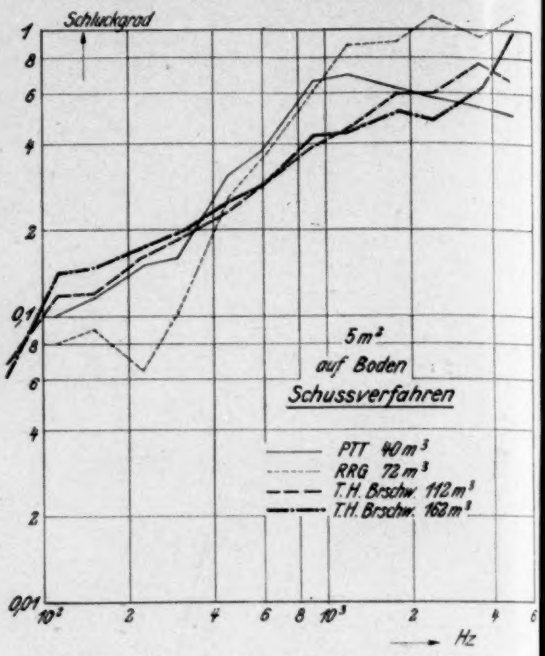



Abb. 8. Meßergebnisse bei 5 m² Prüfstoff in einer Fläche; Knall

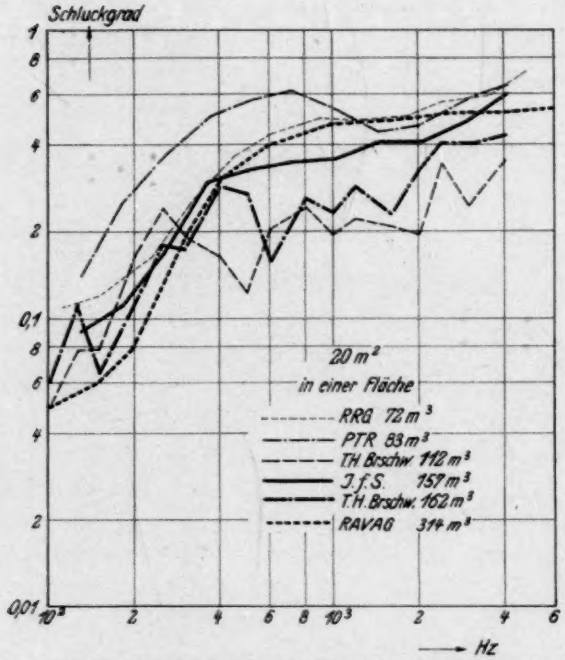



Abb. 7. Meßergebnisse bei 20 m² Prüfstoff in einer Fläche; Heultöne

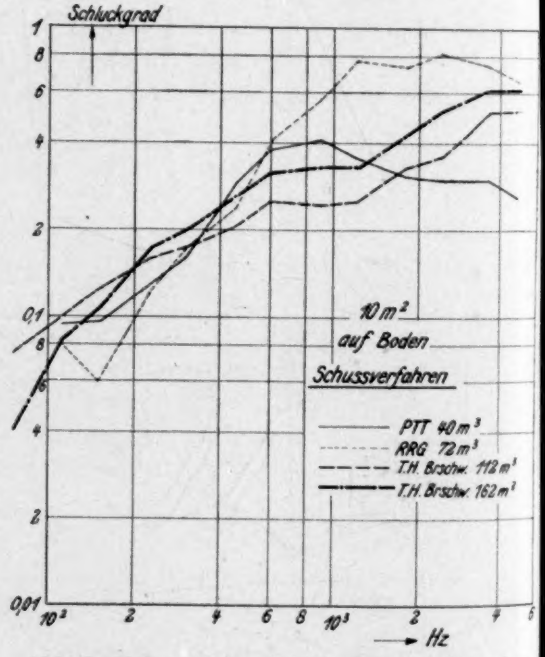



Abb. 9. Meßergebnisse bei 10 m² Prüfstoff in einer Fläche; Knall

so stark, und die Abweichungen zwischen verschiedenen Hallräumen sind geringer.

Zum Vergleich der aus Hallraummessungen erhaltenen Schluckgrade mit den nach direkten Verfahren ermittelten (Abb. 2) ist folgendes zu sagen: Im Bereich der mittleren Frequenzen (250 bis 800 Hz) sind die Hallraumwerte höher als die bei senkrechtem Schalleinfall direkt gemessenen. Dieser Unterschied ist vielleicht nur darauf zurückzuführen, daß der Schluckgrad bei schiefen Einfallswinkeln, wie sie im Hallraum häufig vor-

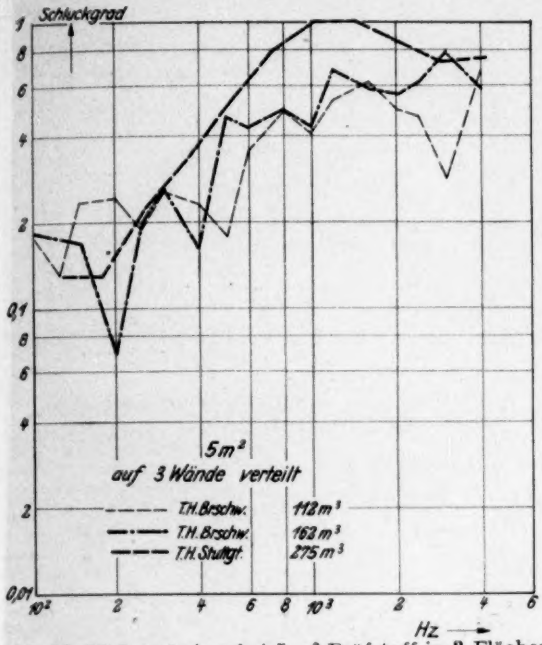



Abb. 10. Meßergebnisse bei 5 m² Prüfstoff in 3 Flächen; Heultöne

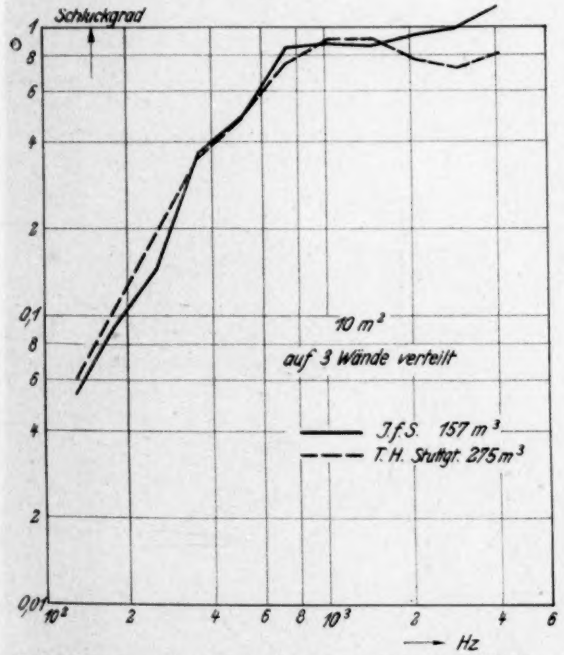



Abb. 11. Meßergebnisse bei 10 m² Prüfstoff in 3 Flächen; Heultöne

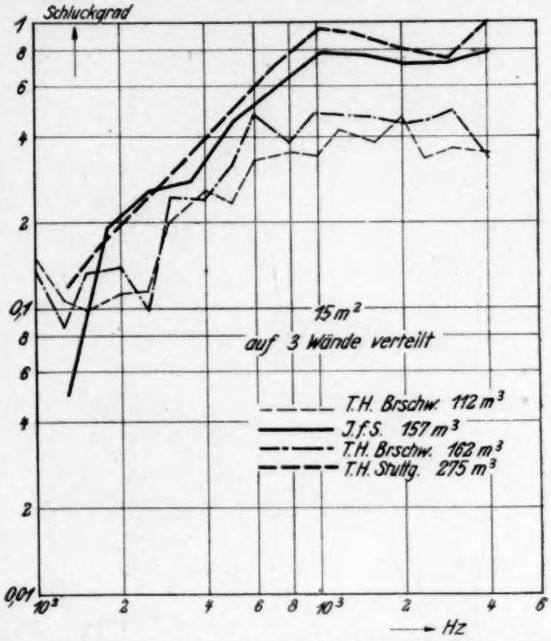



Abb. 12. Meßergebnisse bei 15 m² Prüfstoff in 3 Flächen; Heultöne

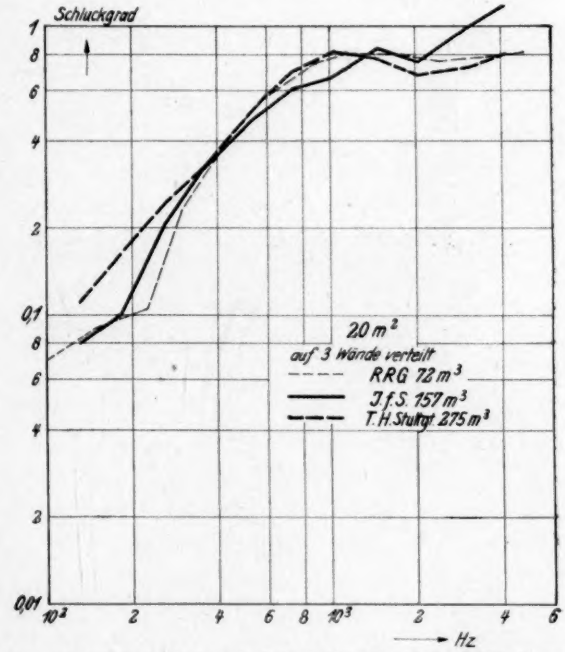



Abb. 13. Meßergebnisse bei 20 m² Prüfstoff in 3 Flächen; Heultöne

kommen, höher ist. Im Bereich der hohen Frequenzen (800 bis 3000 Hz) erhält man ungefähr Übereinstimmung der Hallraumwerte mit den direkt gemessenen Werten bei 15 m² Prüfstoff, verteilt auf drei Wände (vgl. Abb. 12).

Im IFS. wurden noch einige Versuche angestellt zur Klärung verschiedener Fragen, die sich aus der Diskussion der Vergleichsmessungen ergeben. Zur Klärung der Frage, warum Messungen mit Schuß etwas andere (meist kleinere) Werte liefern als Messungen mit Heulton, wurde die Nachhallzeit des großen Hallraums des IFS. (besetzt mit einer Person, die die Pistole zu bedienen hatte) mit den verschiedensten Schallen bei mehreren Frequenzen aufgenommen. Das Ergebnis zeigt Abb. 14. Die Werte streuen nicht systematisch und nicht viel mehr als normale Heultonmessungen. Dementsprechend ergaben auch einige Schluckgradmessungen, die einmal mit Schüssen und Oktavsieben mit steilen Flanken und einmal mit Heultönen gemacht wurden, keine Unterschiede, die die Fehlergrenze überschreiten (Abb. 15, viereckige und runde Meßpunkte).

Um zu untersuchen, ob verschiedene Meßgeräte größere Abweichungen verursachen können, wurde eine Schluckgradmessung gleichzeitig mit dem Nachhallschreiber nach Meyer und Keidel und mit dem Neumann-schen Pegelschreiber ausgeführt. Logarithmische Kennlinie und Zeitskala der Schreiber wurden vor der Messung sorgfältig geprüft. Die Meßergebnisse sind in Abb. 15 eingezeichnet. Die Abweichungen liegen — wie bei richtiger Eichung der Meßgeräte nicht anders zu erwarten war — innerhalb der Grenzen, die durch zufällige Fehler bestimmt sind. (Wegen der Größe der zufälligen Fehler siehe weiter unten.)

Obwohl also zwei verschiedene Nachhallmesser dieselben Meßwerte liefern, wurden doch die Ergebnisse der Vergleichsmessungen noch einmal geprüft, indem derselbe Prüfstoff in verschiedenen Flächengrößen und Verteilungen in drei verschiedenen Hallräumen des IFS. (quaderförmig, Volumen 35,5; 77,5 und 157 m³) mit derselben Apparatur gemessen wurde. Für diese Untersuchungen wurden die Nachhallmessungen in anderer Weise durchgeführt als bisher. Während bisher bei 11 Frequenzen je 10 Nachhallmessungen bei verschiedenen Mikrophonstellungen und Heultonspektren gemacht wurden, wurde nunmehr der Bereich von 100 bis 4000 Hz in 160 im logarith-

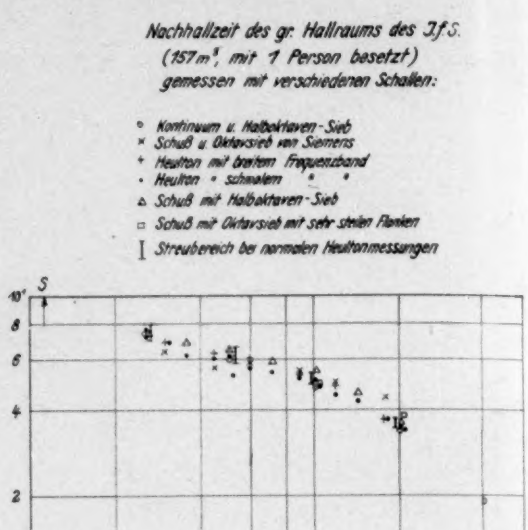



Abb. 14. Nachhallzeit, gemessen mit verschiedenen Schallen

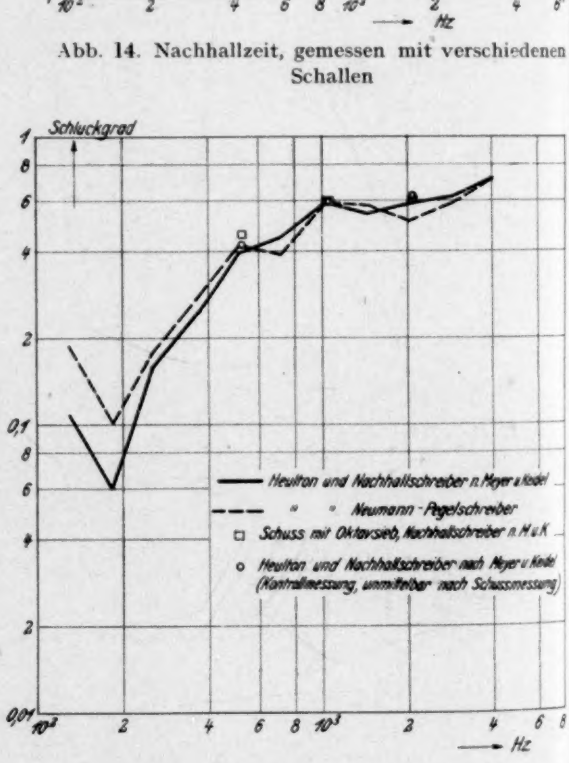



Abb. 15. Schluckgrade nach verschiedenen Nachhall-Meßverfahren

mischen Maßstab gleiche Frequenzintervalle aufgeteilt. Man erhält dann eine fast stetige Nachhallzeit-Frequenzkurve. Auf Änderungen der Mikrophonstellung und des Heultons kann man verzichten und statt dessen die Welligkeit der so erhaltenen Kurven ausmitteln.

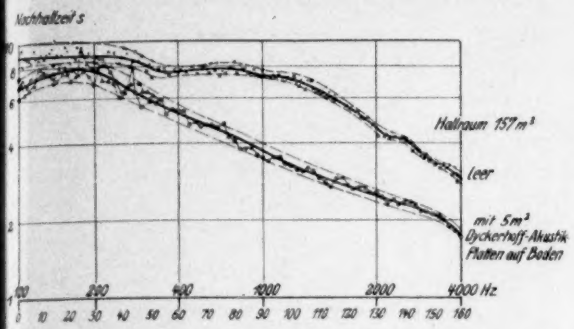



Abb. 16. Kontinuierliche Nachhallzeit-Frequenzkurven

Abb. 16 zeigt ein Meßbeispiel. Zur Berechnung des Schluckgrads wurden außer den gemittelten Kurven noch diejenigen herangezogen, die die Maxima bzw. die Minima der Nachhallzeitkurven verbinden, die also die Schwankungen der Nachhallzeit zwischen sich einschließen. (Siehe Abb. 16.) Sie bestimmen die Größenordnung der zufälligen Fehler. Im Verlaufe der Messungen zeigte sich, daß eine Aufteilung des Frequenzbereichs in 80 Intervalle auch genügte, und daß Messungen bei Frequenzen unter 250 Hz zwecklos waren, weil bei den kleinen Schluckgraden die Fehler zu groß sind.

Die Meßergebnisse bei auf dem Boden ausgelegtem Prüfstoff sind in Abb. 17 bis 19 dar-

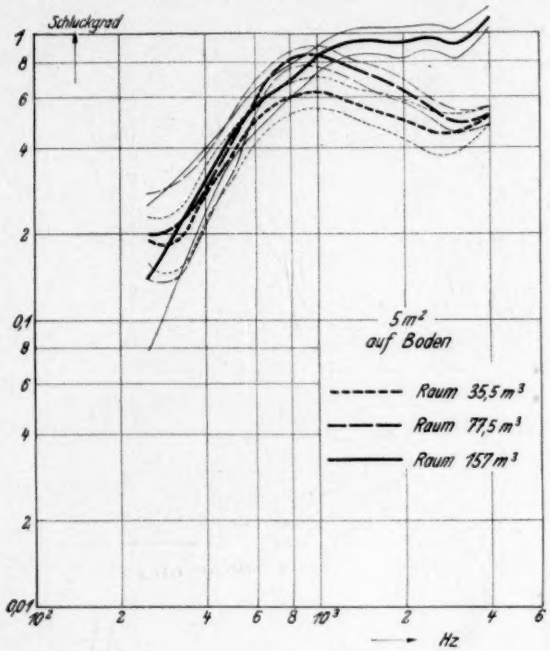



Abb. 18. Schluckgrad bei 5 m² Prüfstoff in einer Fläche

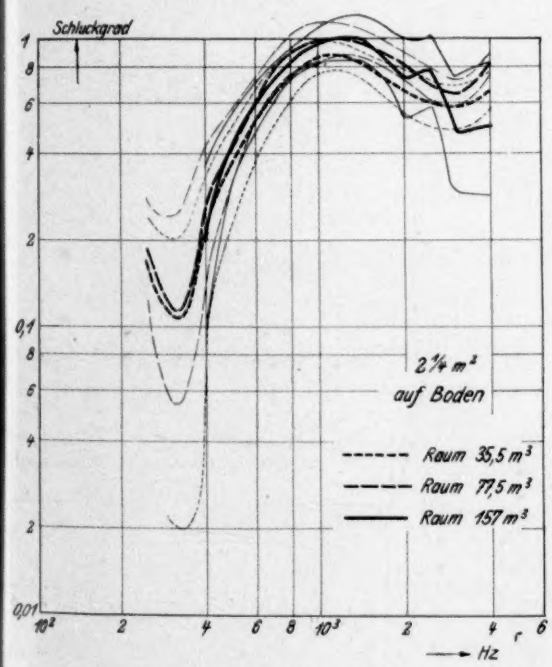



Abb. 17. Schluckgrad bei $2^1/_4$ m² Prüfstoff in einer Fläche

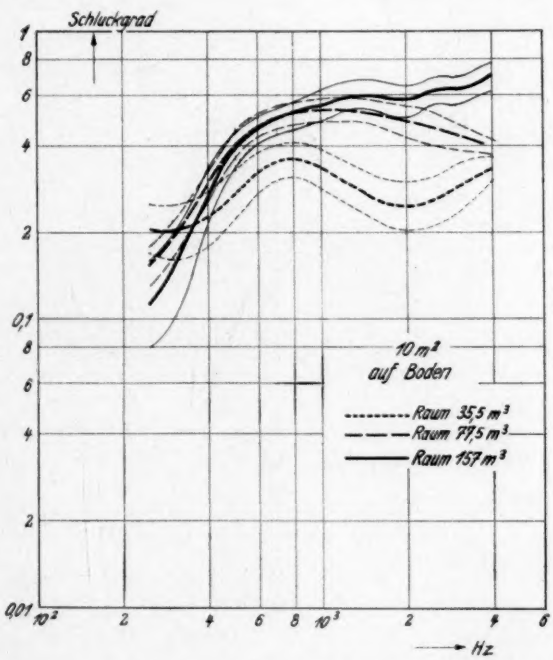



Abb. 19. Schluckgrad bei 10 m² Prüfstoff in einer Fläche

gestellt. Die dünnen Kurven zeigen die Fehlergrenzen. Bei der kleinsten Prüffläche von $2^1/_4$ m² stimmen die Ergebnisse der drei Räume einigermaßen überein. Mit wachsender Prüffläche nimmt der Schluckgrad ab, besonders bei hohen Frequenzen — in Übereinstimmung mit den oben beschriebenen Ergebnissen. Da die Abnahme mit wachsender Prüffläche für die Räume verschieden ist (sie scheint um so stärker zu sein, je kleiner der Raum ist), stimmen die Schluckgrade bei größeren Prüfflächen nicht mehr überein. Bei 10 m² Prüffläche auf dem Boden wurden einige Versuche gemacht über den Einfluß der Anordnung des Prüfstoffs, Lautsprecher- und Mikrophonstellung (Prüffläche in der Mitte, in der Ecke, verteilt auf zwei gegenüberliegende Ecken, Lautsprecher bzw. Mikrophon weit entfernt vom Prüfstoff und auf dem Prüfstoff aufgestellt). Es ergab sich innerhalb der Schwankungsgrenzen immer dieselbe Nachhallzeit-Frequenzkurve.

Wird der Prüfstoff auf drei aufeinander senkrechte Wände verteilt, dann wird bei gleichen Prüfflächen die Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Räumen wesentlich besser (Abb. 20 bis 22). Die Abhängigkeit des Schluckgrads von der Prüffläche ist noch vorhanden, aber auch geringer. Da es hiernach so aussieht, als ob die Abweichungen zwischen verschiedenen Räumen um so geringer werden, je gleichmäßiger alle Raumrichtungen durch den Schluckstoff erfaßt werden, wurden die

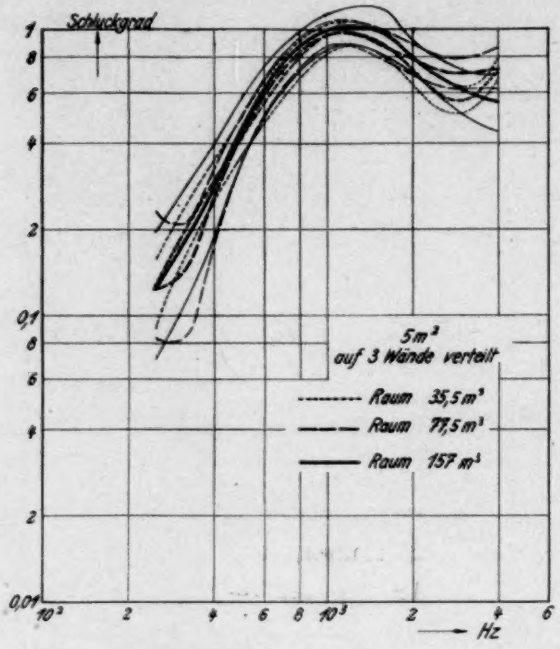



Abb. 20. Schluckgrad bei 5 m² Prüfstoff in 3 Flächen

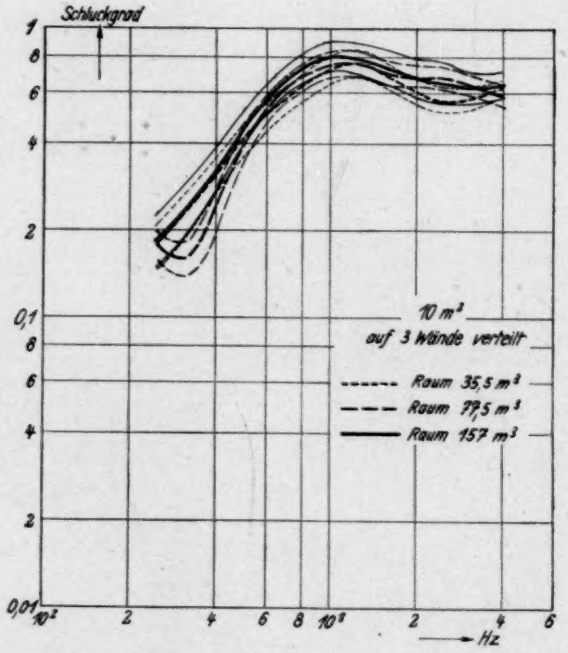



Abb. 21. Schluckgrad bei 10 m² Prüfstoff in 3 Flächen

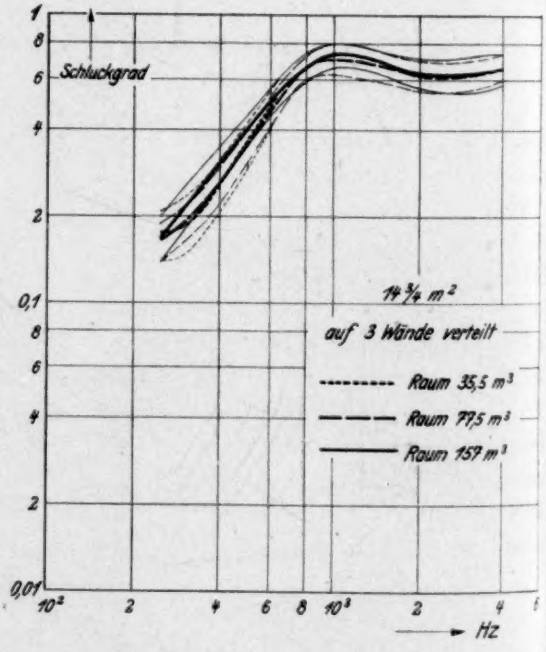



Abb. 22. Schluckgrad bei $14^3/_4$ m² Prüfstoff in 3 Flächen

Messungen mit auf drei Wände verteiltem Schluckstoff in den beiden größeren Hallräumen wiederholt und dabei zusätzlich ein „Schallrührwerk" zur besseren Durchmischung der Schallwellenrichtungen angewandt. Das Rührwerk bestand aus einer $2 \cdot 2$ m² großen versteiften Blechplatte, deren Ebene um etwa 45° gegen die vertikale Achse geneigt war, um welche die Platte mit einer halben Umdrehung pro Sekunde rotierte. Die Meßergebnisse zeigt

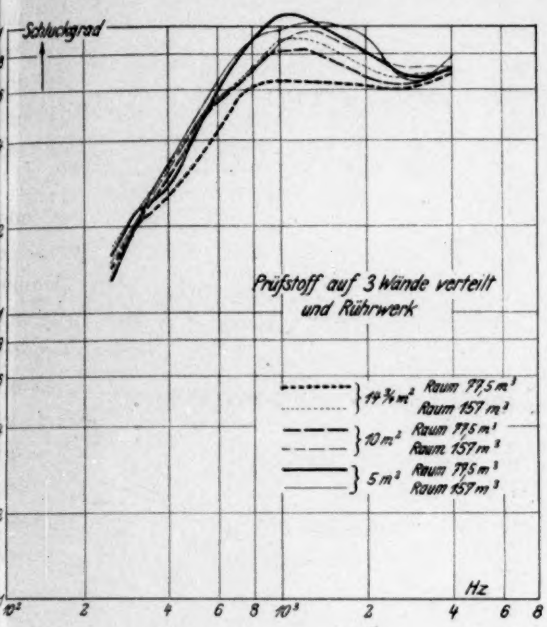



Abb. 23. Schluckgrad bei verteiltem Prüfstoff und Schallrührwerk

Abb. 23. Sie stellen gegenüber den Ergebnissen ohne Rührwerk keinen Fortschritt dar. Verteilt man eine Prüffläche von 5 m² auf 3 Wände, so sind die zusammenhängenden Schluckstofflächen etwa 1,7 m² groß, d. h. ihre linearen Abmessungen betragen nur etwa 1,3 m. Man kann einwenden, daß so kleine Prüfflächen nicht mehr genügend groß im Vergleich zur Wellenlänge sind, um einwandfreie Meßergebnisse zu liefern. Es hat sich nun aber gezeigt, daß Messungen mit so kleinen Prüfflächen trotzdem noch brauchbare Ergebnisse liefern, die außerdem weniger vom Raum abhängen als Messungen mit großen Prüfflächen (vgl. die Abb. 17 bis 22). Aber auch durch eine theoretische Betrachtung kann man plausibel machen, daß die Verwendung kleiner Prüfflächen unbedenklich ist: Selbst in dem extremen Fall, daß die Schluckfläche ein offenes Fenster ist, geht — wie die Beugungstheorie lehrt[2]) — auch durch eine kleine Öffnung bis auf wenige Prozent dieselbe Gesamt-Schalleistung hindurch wie bei geometrisch-optischer Betrachtung. Diese geschluckte Gesamtleistung kann man mit dem Nachhallverfahren messen, hingegen nicht mehr nach einem direkten Reflexionsverfahren, weil das durch die Beugung modifizierte Schallfeld zu kompliziert ist.

## V. Folgerungen für eine Prüfvorschrift

Die vorstehend zusammengestellten Ergebnisse erlauben nur beschränkte Folgerungen für zukünftige Prüfvorschriften, da nur ein Prüfstoff und damit eine Schluckzahlgröße für jede Tonhöhe geprüft wurde.

1. Zum Meßverfahren:

   Eine Messung der Nachhallzeit in möglichst kleinen Frequenzschritten ist zu empfehlen.

2. Zum Anbringen der Schluckstoffe im Hallraum:

   Der Schluckstoff ist auf 3 nicht parallele Flächen zu verteilen; die Flächengröße ist klein zu halten, je nach Raumgröße 5 bis 15 m² insgesamt.

3. Zur Nachhallformel:

   Eine Anwendung der Eyringschen Formel erweist sich als nicht notwendig. Ob der Ausrechnung des Schluckgrades statt der Sabine-Jägerschen Formel vielleicht besser die Millingtonsche Formel zugrunde zu legen ist, bedarf noch weiterer Untersuchungen.

[2]) M. J. O. Strutt. Z. Physik 69 (1931) 597.

*(Eingegangen am 1. September 1938.)*

# MITTEILUNGEN DES DEUTSCHEN AKUSTISCHEN AUSSCHUSSES

In der Sitzung des Deutschen Akustischen Ausschusses am 27. Oktober 1938 wurde beschlossen, nachfolgende Ausarbeitungen, die als deutsche Beiträge für die 2. Internationale Akustische Konferenz der ISA (Internationale Foederation der Nationalen Normenvereinigungen, Basel) zugeleitet worden sind, zu veröffentlichen.

Es wird gebeten, Einwendungen gegen diese Beiträge bis spätestens zum 1. April 1939 dem Deutschen Akustischen Ausschuß, Physikalisch-Techn. Reichsanstalt, Berlin NW 87, Franklinstr. 22, zuzusenden.

GRÜTZMACHER

## Eichung von Mikrophonen (Vereinheitlichung der Meßverfahren)[1]). ISA 43, UK 3a

**Sachbearbeiter: Kösters**

zusammen mit den Herren: BENECKE, VON BRAUNMÜHL, ERNSTHAUSEN, GRÜTZMACHER, HARTMANN, JANOVSKY, PANZERBIETER, TRAGE.

I. Frequenzkurven des inneren Widerstandes, des Übertragungsmaßes und der Übertragungsgröße.
II. Nichtlineare Verzerrungen.
III Richtkennlinien bei verschiedenen Frequenzen.
IV. Eigengeräusch.

### I. Frequenzkurven des inneren Widerstandes, des Übertragungsmaßes und der Übertragungsgröße

Die Messung des Übertragungsmaßes in Abhängigkeit von der Frequenz erfolgt in der fortschreitenden Welle oder bei hierfür geeigneten Mikrophonen durch eine Druckeichung. Man unterscheidet demnach ein Druckübertragungsmaß (7, 11, 12)[2]) (EMK je Einheit des Schalldruckes an der Mikrophonmembran) und ein Feldübertragungsmaß (EMK je Einheit des Schalldruckes in der fortschreitenden Welle). Da die betriebsmäßige Empfindlichkeit eines Mikrophons erst in Verbindung mit dem inneren Widerstand beurteilt werden kann, empfiehlt es sich, das Übertragungsmaß $\ddot{u}$ auf die Einheit des inneren Widerstandes $R_i$ zu beziehen und die Übertragungsgröße $\dot{U}$

$$\dot{U} = \frac{\ddot{u}}{\sqrt{R_i}}$$

zu bilden.

Bei Mikrophonen, die mit einem Übertrager oder Vorverstärker eine bauliche Einheit bilden, kann dieser in die Messung mit einbezogen werden.

#### *a) Frequenzkurve des inneren Widerstandes*

*1. Messung*

Die Frequenzkurve des inneren Widerstandes wird nach einem der bekannten Verfahren nach Betrag und Phase gemessen.

*2. Angaben*

Die Abhängigkeit des Betrages und des Winkels von der Frequenz kann in zwei gesonderten Kurven oder durch eine einzige Ortskurve dargestellt werden.

#### *b) Übertragungsmaß und Übertragungsgröße, bezogen auf den Schalldruck am Mikrophon*

*1. Messung*

Das Mikrophon bildet mit seiner Membran eine Wand einer starren Druckkammer. Durch Wahl der Kammerabmessungen und gegebenenfalls des Füllgases muß eine quasi-stationäre Druckverteilung in der Kammer erreicht werden. Der Druck in der Kammer kann nach dem Kompensationsverfahren (4, 7, 8, 14) gemessen oder bei Benutzung einer Thermophonfolie (2, 3, 5, 16, 20) berechnet werden.

*2. Angaben*

Das Druckübertragungsmaß wird in mV/$\mu$b, die Druckübertragungsgröße in mV/$\mu$b$\sqrt{\Omega}$ angegeben.

---

[1]) Zur Eichung von Fernsprechmikrophonen und solchen anderen Mikrophonen, die an einem bestimmten Benutzungsabstand gebunden sind, reichen die beschriebenen Meßverfahren nicht aus.

[2]) Die eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf das Literaturverzeichnis am Schluß dieses Entwurfes.

Die graphische Darstellung erfolgt in doppelt logarithmischem Maßstab. Für den Übertragungsmaßbereich (bzw. Bereich der Druckübertragungsgröße) 1 : 10 ist die gleiche Länge wie für den Frequenzbereich 1 : 10 vorzusehen, wobei für 4 Dekaden eine Länge von 25 cm empfohlen wird. Für die Ordinate kann zusätzlich ein zweiter Maßstab in db benutzt werden.

Soll die Empfindlichkeit des Mikrophons kurz beschrieben werden, so wird die Übertragungsgröße für 1000 Hz angegeben.

### *c) Übertragungsmaß und Übertragungsgröße, bezogen auf das Schallfeld*

*1. Messung*

Die Feldeichung wird im Freien oder im schallgedämpften Raum in einer fortschreitenden Welle vorgenommen. Der Abstand des Mikrophons von der Schallquelle muß nach Möglichkeit groß gegenüber der Phasenlänge der tiefsten zu messenden Frequenz sein. Kann diese Bedingung z. B. bei tiefen Frequenzen nicht erfüllt werden, so muß der bekannte Einfluß des Kugelschallfeldes (19) auf das Verhalten der Druckgradienten und Schnelleempfänger berücksichtigt werden. Der Schalldruck wird vor dem Einbringen des Mikrophons an derselben Stelle des Schallfeldes gemessen. Dies geschieht grundsätzlich mit einem nach I b geeichten Druckempfänger. Um den Druck in der freien Welle aus dem Druck an der Membran dieses Druckempfängers zu erhalten, ist dessen Schallfeldverzerrung (11, 14, 15, 22) zu berücksichtigen.

*2. Angaben*

Für die Kurvendarstellung und Zahlenangaben gelten sinngemäß die in Abschnitt I b 2 dargelegten Anweisungen.

## II. Nichtlineare Verzerrungen

Die nichtlinearen Verzerrungen eines Mikrophons können ausreichend durch den Klirrfaktor (6, 10, 13, 21) sowie durch den Differenztonfaktor 1. und 2. Ordnung (1, 17) gekennzeichnet werden. Diese Größen sind folgendermaßen definiert. Erregt man ein Mikrophon mit einem reinen Ton, so können im Mikrophon Obertöne oder gegebenenfalls Ober- und Untertöne entstehen. Das Verhältnis des Effektivwertes der Ober- oder gegebenenfalls der Ober- und Untertöne zum Effektivwert des gesamten Gemisches ist der Klirrfaktor.

Erregt man das Mikrophon mit zwei reinen Tönen von der Frequenz $f + n$ und $f - n$, so kann vorwiegend durch den quadratischen Anteil der Kennlinie ein Differenzton von der Frequenz $2n$ entstehen. Das Verhältnis des Effektivwertes dieses Differenztones zur Summe der Effektivwerte der beiden anregenden Töne ist der Differenztonfaktor 1. Ordnung.

Außerdem können zwei Differenztöne 2. Ordnung entstehen, deren Frequenzen $2(f+n) - (f-n) = f+3n$ und $2(f-n) - (f+n) = f-3n$ sind. Das Verhältnis der Summe der Effektivwerte der beiden Differenztöne 2. Ordnung zur Summe der Effektivwerte der beiden zur Anregung benutzten reinen Töne ist der Differenztonfaktor 2. Ordnung.

### *a) Klirrfaktor*

*1. Messung*

Die Bestimmung des Klirrfaktors erfolgt in der fortschreitenden Welle oder in der Druckkammer bei verschiedenen Frequenzen. Der Schalldruck und die benutzten Frequenzen sind den Betriebsbedingungen anzupassen. Der benutzte Schalldruck soll hierbei dem bei normalem Betrieb zu erwartenden Höchstschalldruck entsprechen. Bei der Auswahl der Frequenzen sind die Resonanzstellen des Mikrophons zu berücksichtigen. Die Messung erfolgt mit Hilfe einer Klanganalyse (9) oder einer Klirrfaktormeßbrücke (10).

*2. Angaben*

Der Klirrfaktor wird in Abhängigkeit von der Frequenz in v. H. angegeben. Bei der graphischen Darstellung ist der Frequenzmaßstab logarithmisch und der Prozentenmaßstab linear. Der benutzte Schalldruck ist anzugeben.

### *b) Differenztonfaktor 1. Ordnung*

*1. Messung*

Zur Messung des Differenztonfaktors (23) 1. Ordnung bei der Frequenz $f$ erregt man das Mikrophon mit zwei reinen Tönen von gleichem Schalldruck. Bei der Wahl der Frequenz $n$ sind folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen. $n$ darf nicht zu klein sein, damit der Differenzton innerhalb des Übertragungsbereiches liegt. $n$ darf andererseits nicht zu groß sein, damit die Messung bis zu tiefen Frequenzen ausgedehnt werden kann. Schließlich soll weder der Wert $n$ noch $2n$ in die Nähe der Netzfrequenz fallen. Es wird empfohlen, die Frequenz $n = 30$ Hz zu benutzen. Hinter einem Filter wird der Effektivwert des Differenztones 1. Ordnung ($2n$) gemessen und der Differenztonfaktor berechnet.

Schalldruck und Frequenzbereich sind den Betriebsbedingungen anzupassen. Der Schalldruck soll dem bei normalem Betrieb zu erwartenden Höchstschalldruck entsprechen.

*2. Angaben*

Der Differenztonfaktor 1. Ordnung wird in Abhängigkeit von der Frequenz in v. H. angegeben.

Bei der graphischen Darstellung ist der Frequenzmaßstab logarithmisch und der Prozentenmaßstab linear. Der benutzte Schalldruck ist anzugeben.

*c) Differenztonfaktor 2. Ordnung*

*1. Messung*

Zur Messung des Differenztonfaktors 2. Ordnung bei der Frequenz $f$ erregt man das Mikrophon mit zwei reinen Tönen von gleichem Schalldruck, deren Frequenzen $f + n'$ und $f - n'$ sind. Die Effektivwerte der entstehenden Differenztöne 2. Ordnung $2(f + n') - (f - n') = f + 3n'$ und $2(f - n') - (f + n') = f - 3n'$ werden gemessen und der Differenztonfaktor berechnet. Es wird empfohlen, $n'$ halb so groß wie $n$ zu wählen. Im übrigen sind für die Wahl der Frequenz $n'$ dieselben Gesichtspunkte wie für die Wahl der Frequenz $n$ (s. II b 2) maßgebend.

*2. Angaben*

Für den Differenztonfaktor 2. Ordnung sind dieselben Angaben zu machen wie für den Differenztonfaktor 1. Ordnung.

## III. Richtkennlinien bei verschiedenen Frequenzen

Bei der Messung der Richtkennlinien (13) sind die in Abschnitt I c 1 angegebenen Empfehlungen zu berücksichtigen.

*1. Messung*

Die Bestimmung der Richtkennlinien erfolgt durch Messung des Feldübertragungsmaßes für verschiedene Einfallswinkel und verschiedene Frequenzen. Die Auswahl ist nach dem zu übertragenden Frequenzband zu treffen.

*2. Angaben*

Die Darstellung der Richtkennlinien erfolgt in einem Polardiagramm mit linearem Maßstab in relativem Maß. Die Richtkennlinien für den Winkel 0 werden hierbei durch einen Punkt gelegt.

## IV. Eigengeräusch

Das Eigengeräusch eines Mikrophons kann durch die Fremd-EMK, die Fremdspannungsgröße, die Geräusch-EMK, die Geräuschspannungsgröße, den Ersatzstördruck und die Ersatzlautstärke beschrieben werden.

Die Fremd-EMK ist die bei unbeschalltem Mikrophon auftretende EMK.

Da die betriebsmäßige Eigenstörung des Mikrophons nur in Verbindung mit dem inneren Widerstand beurteilt werden kann, empfiehlt es sich, die Fremd-EMK $E_f$ auf die Einheit des inneren Widerstandes $R_i$ bei 1000 Hz zu beziehen und die „Fremdspannungsgröße"

$$\frac{E_f}{\sqrt{R_i}}$$

zu bilden.

Die Geräusch-EMK ist die bei unbeschalltem Mikrophon auftretende, nach einer Ohrkurve bewertete EMK.

Da das betriebsmäßige Eigengeräusch des Mikrophons nur in Verbindung mit dem inneren Widerstand beurteilt werden kann, empfiehlt es sich, die Geräusch-EMK $E_g$ auf die Einheit des inneren Widerstandes $R_i$ zu beziehen und die „Geräuschspannungsgröße"

$$\frac{E_g}{\sqrt{R_i}}$$

zu bilden.

Der Ersatzstördruck ist das Verhältnis der Fremd-EMK zum Übertragungsmaß.

Die Ersatzlautstärke ist das Verhältnis der Geräusch-EMK zum Übertragungsmaß bei 1000 Hz.

*a) Fremd-EMK und Fremdspannungsgröße*

*1. Messung*

Die Fremd-EMK wird nach einem der bekannten Verfahren gemessen. In manchen Fällen ist es zweckmäßig, die Fremd-EMK in Abhängigkeit von der Frequenz zu messen. Hierzu kann der Übertragungsbereich durch Siebe im Bereich konstanten Intervalls unterteilt werden, z. B. in Oktaven oder Dritteloktaven.

*2. Angaben*

Die Fremd-EMK wird in mV angegeben. Die Fremdspannungsgröße wird mit dem Widerstand bei 1000 Hz gebildet und in $\mathrm{mV}/\sqrt{\Omega}$ angegeben. Bei Unterteilung werden die Werte den Schwerpunkten der Frequenzbereiche zugeordnet und als Kurve dargestellt. Für die Bildung der Fremdspannungsgröße sind in diesem Falle die inneren Widerstände bei den Schwerpunktfrequenzen zu wählen.

*b) Geräusch-EMK und Geräuschspannungsgröße*

*1. Messung*

Zur Messung der Geräusch-EMK wird die Eigenstörspannung mit der Kurve des Geräuschspannungszeigers des CCIF bewertet[3]).

*2. Angaben*

Die Geräusch-EMK wird in mV angegeben. Die Geräuschspannungsgröße wird mit dem inneren Widerstand bei 1000 Hz gebildet und in $\mathrm{mV}/\sqrt{\Omega}$ angegeben.

[3]) Vgl. Geräuschspannungszeiger des CCIF, Weißbuch, Bd. 4, S. 258 u. 259.

*c) Ersatzstördruck*

*1. Messung*

Die Bestimmung des Ersatzstördruckes setzt die Messung der Fremdspannung und des Übertragungsmaßes voraus.

*2. Angaben*

Der Ersatzstördruck (Fremd EMK/Übertragungsmaß) wird in $\mu$b angegeben. Bei Unterteilung werden die Werte den Schwerpunkten der Bereiche zugeordnet und als Kurve dargestellt. Für den Ersatzstördruckbereich 1 : 10 ist die gleiche Länge wie für den Frequenzbereich 1 : 10 vorzusehen, wobei für 4 Dekaden eine Länge von 25 cm empfohlen wird. Für die Ordinate kann zusätzlich ein zweiter Maßstab in db benutzt werden.

*d) Ersatzlautstärke*

*1. Messung*

Die Bestimmung der Ersatzlautstärke setzt die Messung der Geräuschspannung und des Übertragungsmaßes bei 1000 Hz voraus.

*2. Angaben*

Die Ersatzlautstärke wird in db bezogen auf $2 \cdot 10^{-4}$ $\mu$b angegeben.

## V. Schrifttumverzeichnis


1. E. Waetzmann, Die Entstehungsweise von Kombinationstönen im Mikrophon-Telephonkreis. Ann. Physik 42 (1913), H. 4, S. 729.
2. H. D. Arnold und I. B. Crandall, The Thermophone as a Precision Source of Sound. Physic. Rev. 10 (1917), S. 22.
3. E. C. Wente, The Thermophone. Physic. Rev. 19 (1922), S. 333.
4. E. Gerlach, Messungen von Schall-Druckamplituden. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 3 (1923), S. 139.
5. F. Trendelenburg, Wirkungsweise und Anwendung des Thermophons. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 3 (1923), S. 212.
6. K. Küpfmüller, Über nichtlineare Verzerrung in Fernverbindungen. Fachber. VDE, 31. Jahresversammlung (1926), S. 87.
7. C. A. Hartmann, Messungen an Mikrophonen u. Telephonen. Elekt. Nachr.-Techn. 3 (1926), S. 458.
9. M. Grützmacher, Eine neue Methode zur Klanganalyse. Elektr. Nachr.-Techn. 4 (1927), S. 534.
8. E. Meyer, Über die Messung der Geschwindigkeitsamplitude u. der Druckamplitude in Schallfeldern. Elektr. Nachr.-Techn. 4 (1927), S. 86.
10. C. A. Hartmann, Neuere Untersuchungen an Kohlemikrophonen. Elektr. Nachr.-Techn. 5 (1928), S. 344.
11. C. A. Hartmann, Schalldruckmessungen an Mikrophonen, Telephonen und im freien Schallfeld. Elektr. Nachr.-Techn. 7 (1930), S. 100.
12. W. West, Pressure on Diaphragm of a Condenser Transmitter. Proc. Inst. Electr. Engr. 5 (1930), S. 145.
13. C. A. Hartmann, Verzerrungen bei Mikrophonen und Lautsprechern. Z techn. Physik 13 (1932), S. 9.
14. St. Ballantine, Technique of Microphone Calibration. J. Acous. Soc. Am. 3 (1932), S. 319.
15. L. J. Sivian und H. T. O'Neil, On Sound Diffraction by Rigid Circular Plate, Square Plate and Semi-infinite Screen. J. Acous. Soc. Am. 3 (1932), S. 483.
16. W. Geffcken und L. Keibs, Untersuchungen über akustische Schwellwerte; II. Das Thermophon und seine Verwendung als akustisches Meßinstrument. Ann. Physik 16 (1933), H. 5, S. 404.
17. H. J. von Braunmühl und W. Weber, Nichtlineare Verzerrungen von Mikrophonen. Elektrotechn. Z. 54 (1933), S. 1068.
18. Weißbuch des CCIF IV (1934), S. 258 (X. Vollversammlung, Budapest).
19. Z. B. H. F. Olson und F. Massa, Applied Acoustics, Philadelphia, P. Blakiston's Son & Co. (1934), S. 9.
20. G. von Békésy, Über die Hörschwelle und Fühlgrenze langsamer sinusförmiger Luftdruckschwankungen. Ann. Physik 26 (1936), H 5, S. 554.
21. H. J. von Braunmühl und W. Weber, Über die Störfähigkeit nichtlinearer Verzerrungen. Akust. Z. 2 (1937), S. 135.
22. G. G. Müller, R. Black und F. E. Davis, The Diffraction Produced by Cylindrical and Cubical Obstacles and by Circular and Square Plates. J. Acous. Soc. Am. 10 (1938), S. 6.
23. H. G. Thilo und H. Koschel, Die Wirkungsweise des Verzerrungsmeßplatzes für Rundfunkleitungen. Siemens-Z. 18 (1938), S. 273.


---

## Prüfung von Lautsprechern (Vereinheitlichung der Meßverfahren) ISA 43, UK 3a

**Sachbearbeiter: E. Meyer**

zusammen mit den Herren: Benecke, von Braunmühl, Buchmann, Janovsky, Kösters, Lichte, E. Lübcke, Thienhaus, Tischner, Weber.

Der Lautsprecher wird bezüglich seiner Schallwiedergabeeigenschaften durch 5 Angaben gekennzeichnet:

1. Wiedergabebereich (Frequenzband, lineare Verzerrungen).

2. Klirrfaktor (nichtlineare Verzerrungen).
3. Richtwirkung.
4. Wirkungsgrad.
5. Belastbarkeit.

### 1. Wiedergabebereich

Zur Kennzeichnung des Wiedergabebereiches eines Lautsprechers wird das Übertragungsmaß $\ddot{u}$, Schalldruck je EMK in Abhängigkeit von der Frequenz angegeben. Für die betriebsmäßige Beurteilung von Lautsprechern verschiedenen inneren Widerstandes empfiehlt es sich, die Übertragungsgröße $\ddot{U} = \ddot{u}\sqrt{R_i}$ ($R_i$ = Betrag des inneren Widerstandes) zu bilden.

Für die Bestimmung dieser Größen gelten folgende Richtlinien.

#### *a) Elektrische Erregung*

Im praktischen Betriebe erfolgt die elektrische Erregung des Lautsprechers mit Wechselspannungen am Gitter der Endröhre. Die im Lautsprecherkreis auftretenden Wechselspannungen und Wechselströme hängen vom Röhreninnenwiderstand und vom Lautsprecherscheinwiderstand ab. Um die Lautsprecherfrequenzabhängigkeit für alle vorkommenden Innenwiderstände angeben zu können, ist außer der Art der Anregung (konstante EMK, konstante Spannung, konstanter Strom u. ä.) die Kenntnis des Lautsprecherscheinwiderstandes, mindestens in seinem Betrag, notwendig.

Vorschlag: Der Lautsprecher ist mit konstanter EMK zu betreiben; der Innenwiderstand der gewählten Stromquelle soll dabei reell und konstant sein; er ist anzugeben. Der Betrag des Lautsprecherscheinwiderstandes ist in Abhängigkeit von der Frequenz anzugeben. Wird ein vorgeschalteter Transformator als zum Lautsprecher gehörig betrachtet, so kann er in die Frequenzabhängigkeit einbezogen werden.

Der zu messende Frequenzbereich richtet sich nach den Anforderungen an den Lautsprecher und wird nicht festgelegt. Die Messung kann mit einer reinen oder einer frequenzmodulierten Wechselspannung (Wabbelton) erfolgen. Die Möglichkeit der Impulserregung für Zwecke der Lautsprechermessung wird als noch zu wenig geklärt hier und im folgenden unberücksichtigt gelassen. Es wird empfohlen, die Messung bis zu derjenigen oberen und unteren Grenzfrequenz durchzuführen, bei der das Übertragungsmaß noch 1% des höchsten vorkommenden Wertes beträgt (Abfall um 40 db).

Vorschlag: Die Messung ist nach Möglichkeit mit einem gleitenden Ton durchzuführen. Die Änderungsgeschwindigkeit der Tonhöhe ist so zu wählen, daß das Ableseinstrument auch bei scharf ausgeprägten Resonanzstellen den vollen Wert zeigt. Für die Messung im Freien und im schallgedämpften Raum ist der reine Ton zu nehmen; für die Messung in Räumen mit größerer Nachhallzeit ist der Wabbelton zu benutzen. Seine Bandbreite ist so zu wählen, daß die Resonanzstellen des Lautsprechers nicht verwischt werden, die Resonanzen des Raumes dagegen in der Kurve nicht zum Ausdruck kommen. Diese Bedingung läßt sich nur bei nicht zu geringer Dämpfung des Meßraumes erfüllen. — Bandbreite und Wabbelfrequenz sind anzugeben.

#### *b) Räumliche Bedingungen*

Für die Messung des Schallfeldes in verschiedenen Abstrahlungsrichtungen eines Lautsprechers kommen nur der gedämpfte (schalltote) Raum oder das Freie in Betracht; die Abstände des Lautsprechers von den Wänden des schalltoten Raumes sind größer als die Wellenlänge zu wählen.

Ein Raum gilt als schalltot im Sinne dieses Abschnittes dann, wenn stehende Wellen in der für die Messung benutzten Entfernung vom Lautsprecher praktisch nicht auftreten.

Vorschlag: Die räumlichen Bedingungen sind anzugeben.

Meßentfernung und Meßrichtung richten sich nach Lautsprecherart und Meßraum. Mit Rücksicht auf das Nahfeld ist die Meßentfernung groß gegen die Phasenlänge zu wählen.

Vorschlag: Meßentfernung und Meßrichtung sind anzugeben. Empfohlen wird eine Meßentfernung von 1 m. In der Regel ist die Meßrichtung die Hauptabstrahlungsrichtung. Bei Lautsprecherkombinationen werden die Einzellautsprecher gemessen; als Ganzes können Kombinationen in einer Entfernung gemessen werden, die groß gegenüber den Mittenabständen der Einzellautsprecher ist.

#### *c) Lautsprechereinbau*

Das Gehäuse, der Schallschirm oder der Schalltrichter werden grundsätzlich als zum Lautsprecher gehörig betrachtet. Liegt das Lautsprechersystem eines trichterlosen Lautsprechers allein vor, so ist zur Messung ein Schallschirm zu nehmen.

Vorschlag: Die Schallschirmgröße oder die Art des Lautsprechereinbaus sind anzugeben. Als Schallschirm wird ein rechteckiger Schirm von den Seitenlängen 90 cm und 110 cm mit zentraler Lage des Lautsprechers empfohlen.

#### *d) Schallmeßgerät*

Man kann den Schalldruck, den Schalldruckgradienten oder die Schallschnelle messen; bei bekannter Form des Schallfeldes sind diese Größen aufeinander umrechenbar.

Vorschlag: Es wird empfohlen, den Schalldruck mit einem Druckempfänger zu messen, dessen Feldübertragungsmaß bekannt ist.

Angaben: Es wird das Übertragungsmaß, Schalldruck je EMK in $\mu$B/Volt angegeben. Die Meßkurven des Übertragungsmaßes über der Frequenz, abgekürzt als „Frequenzkurven", bezeichnet, sind doppelt logarithmisch aufzutragen. Für den Übertragungsmaßbereich 1 : 10 (20 db) ist die gleiche Länge wie für den Frequenzbereich 1 : 10 vorzusehen. Für die Originalkurven wird eine Länge von 25 cm für 4 Dekaden empfohlen. Soll der Frequenzbereich eines Lautsprechers durch eine Zahl bestimmt werden, so wird empfohlen, denjenigen Bereich anzugeben, innerhalb dessen das Übertragungsmaß nicht mehr als 20 db schwankt.

Etwaige Angaben der Übertragungsgröße sind in entsprechender Weise zu machen.

### II. Klirrfaktor

Nichtlineare Verzerrungen des Lautsprechers werden grundsätzlich durch das Hinzutreten neuer in der Anregungsspannung nicht enthaltener Teilschwingungen festgestellt. Die Anregung kann mit einem Ton erfolgen, es wird der Klirrfaktor bestimmt (effektiver Schalldruck der erzeugten Unter- und Obertöne zum effektiven Schalldruck des Gesamtschalles). Das zweite Verfahren benutzt zwei reine Töne zur Anregung; die entstehenden Kombinationstöne werden gemessen.

Vorschlag: Zur Messung der nichtlinearen Verzerrung wird ein Ton verwendet; die erzeugten Ober- und Untertöne werden gemessen (Angabe des Klirrfaktors in %). Die Schalldruckmessungen sind dazu in der Hauptabstrahlungsrichtung (z. B. Lautsprechermittelachse) auszuführen. EMK oder Schalldruck des Grundtones sowie Meßfrequenz und Meßentfernung sind anzugeben. Es wird empfohlen, den Klirrfaktor für einen zusammenhängenden Frequenzbereich von mindestens einer Oktave bei elektrischer Erregung mit einem Drittel der Spitzenlast (s. Abschnitt V) zu bestimmen. Über auftretende Untertöne sind besondere Angaben zu machen.

### III. Richtwirkung

Das Übertragungsmaß eines Lautsprechers ändert sich mit der Schallabstrahlungsrichtung, und zwar für die verschiedenen Frequenzen in verschiedener Weise. Besonders für die höheren Töne tritt eine starke Richtwirkung auf. Sie wird kurvenmäßig durch die Richtkennlinien in Form von Polardiagrammen dargestellt. Zahlenmäßig kann der Richtungswert in verschiedener Weise definiert werden; beispielsweise kann der Schalldruck an einem Punkt in der Hauptstrahlungsrichtung oder auf den Hauptstrahlungslinien ins Verhältnis gesetzt werden zu dem Schalldruck, den ein Kugelstrahler gleicher Schalleistung am gleichen Ort erzeugen würde. Die zweite Möglichkeit besteht darin, den Winkelbereich festzulegen, in dem der Schalldruck nicht unter einen bestimmten Wert, beispielsweise 10 db unter den Höchstwert absinkt.

Vorschlag: Das Polardiagramm des Schalldruckes ist für verschiedene Frequenzen anzugeben; bei nicht achsialsymmetrischen Lautsprechern sind zwei Polardiagramme in zwei zueinander senkrechten Ebenen aufzustellen. Zur zahlenmäßigen Kennzeichnung der Richtwirkung wird die Angabe des Winkelbereiches empfohlen, innerhalb dessen der Schalldruck nicht die Grenze 10 db unter dem Höchstwert unterschreitet. Die Meßfrequenzen sind anzugeben.

### IV. Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad gibt das Verhältnis der ausgesandten Schalleistung zur aufgewendeten Wechselstromleistung an. Man hat zu unterscheiden zwischen Scheinleistungs-Wirkungsgrad (Scheinwirkungsgrad) und Wirkleistungs-Wirkungsgrad (Wirkungsgrad); der erste ist der praktisch wichtigere.

Die abgegebene Schalleistung kann durch elektrische Messungen der Scheinwiderstände des Lautsprechers im luftleeren Raum bzw. in Luft, durch eine akustische Messung im Hallraum oder durch eine akustische Messung aller in den verschiedenen Richtungen abgestrahlten Schallanteile ermittelt werden. Hinzu tritt die elektrische Leistungsmessung. Bis zum Vorliegen vergleichbarer Meßergebnisse wird ein bestimmtes Meßverfahren nicht festgelegt.

### V. Belastbarkeit

Als Belastbarkeit bezeichnet man die zulässige Spitzenleistung. Man erhält sie durch Bestimmung derjenigen Leistung, die der Lautsprecher ohne Veränderung seines Zustandes im Dauerbetrieb bei musik- oder sprachgemäßer Amplitudenverteilung aushält. Es wird empfohlen, diesen Wert anzugeben.

## Internationale Festsetzung des Stimmtons. ISA 43, UK 3b

**Sachbearbeiter: Grützmacher**

zusammen mit dem Deutschen Stimmtonausschuß

Aus allen bei dem Sekretariat ISA 43, 3b, eingegangenen Beiträgen über die Regelung der Stimmtonfrage geht der Wunsch nach einer einheitlichen internationalen Festsetzung des Stimmtons hervor. Eine internationale Stimmtonkonferenz müßte also sobald als möglich einberufen werden.

Weiter ist zu erkennen, daß für einen Normstimmton von 440 Hz am ehesten eine allgemeine Zustimmung zu erreichen sein wird.

Das Sekretariat ISA 43, 3b, schlägt daher vor:

1. im Frühjahr 1939 eine Internationale Stimmtonkonferenz einzuberufen;
2. dieser Stimmtonkonferenz nachfolgenden Beschluß zur Annahme zu empfehlen:

„Bei allen öffentlichen Musikdarbietungen ist als Stimmton ein Normal-a′ von 440 Hz zu verwenden. Die benutzten Musikinstrumente müssen so gebaut sein, daß sie im eingespielten Zustande eine auf diesem a′ sich aufbauende Stimmung unter normalen Verhältnissen einzuhalten gestatten."

Begründung:

Der Vorschlag unterscheidet sich von den bisherigen Festsetzungen über den Stimmton insofern, als nur die Musizierstimmung festgelegt wird. Wenn überhaupt gestimmt wird, sei es zu Beginn oder während eines Konzertes, wird ohne Rücksicht auf eventuelle Erwärmung der Instrumente o. ä. nach 440 Hz gestimmt.

Die Tonhöhe des Normalstimmtons wurde nicht höher als 440 Hz gewählt, da dem dauernden Höhertreiben der Musizierstimmung, besonders im Hinblick auf den Gesang und die Wiedergabe alter Musik, Einhalt geboten werden muß. In der Tat bedeutet die Festlegung des Musiziertones von 440 Hz eine Erniedrigung der Stimmung, jedenfalls für fast alle Orchester (s. a. Lottermoser, Akust. Z. 3 [1938], S. 60—61).

Der Normstimmton sollte jedoch auch nicht tiefer als 440 Hz liegen, da es wohl eine zu große Umwälzung bedeuten würde, wenn als Musizierton 435 Hz festgelegt würde. (Untersuchungen des Herrn Prof. Jahn von der Hochschule für Musik in Berlin, haben gezeigt, daß schon zur Einhaltung einer Musizierstimmung von 438—440 Hz verschiedene Orchesterinstrumente umgebaut werden mußten.)

Tatsächlich ist das Einhalten der Wiener Beschlüsse von 1885 (435 Hz bei 15° C) in manchen Fällen gleichbedeutend mit der Einhaltung einer Musizierstimmung von 440 Hz.

Weiter erscheinen die Aussichten für eine zwischenstaatliche Festlegung von 440 Hz als Normstimmton am günstigsten zu sein. Amerika und England haben sich auf 440 Hz bzw. 439 Hz festgelegt, Frankreich neigt auch zu 440 Hz, und auch in Italien liegt die Musizierstimmung der Rundfunkorchester über 440 Hz (s. Lottermoser, Akust. Z. 3 [1938], S. 60—61).

Auch die Temperaturfrage, die zu vielen Unsicherheiten geführt hat, dürfte durch die neue Festsetzung in gewissem Umfange umgangen werden. Der Temperaturgang eines Musikinstruments ist gewissermaßen ein Fehler des Instruments. Er ist vom Erbauer möglichst zu vermeiden und muß hinsichtlich der Einhaltung der Normstimmung so in Rechnung gestellt werden, daß „unter normalen Bedingungen", d. h. z. B. während das Instrument im Konzertsaal gespielt wird, die Einhaltung einer Stimmung von 440 Hz möglich ist. Das bedeutet für die Blasinstrumente, daß die größte Reinheit der Instrumente in sich erst im stationären Zustande erreicht wird.

(Sonderfestsetzungen über die Stimmung einzelner Musikinstrumente, z. B. von Orgeln, Blasinstrumenten, über deren Abnahme usw., könnten von der Stimmtonkonferenz ausgearbeitet werden, wenn Übereinstimmung über das allgemeine Vorgehen in der Stimmtonfrage erzielt worden ist.)

Als Stimmtonerzeuger kommt die Oboe mit ihrem starken Temperaturgang nicht in Betracht. Auch müssen Einrichtungen vorgesehen werden, die eine größere Konstanz der Schwingungszahl gewährleisten (z. B. elektrische Stimmgabelgeneratoren, Verteilung des Stimmtons durch den Rundfunk u. ä.).

Wenn auch die Entscheidungen in dieser Frage den einzelnen Ländern überlassen bleiben müssen, sollten doch auf Grund der bisherigen Erfahrungen Empfehlungen gegeben werden.

(Diese Empfehlungen könnten von der Stimmtonkonferenz ausgearbeitet werden, wenn Übereinstimmung über das allgemeine Vorgehen in der Stimmtonfrage erzielt worden ist.)

---

## Beurteilungsgrundlagen für Schallaufzeichnungsverfahren. ISA 43, UK 3a

**Sachbearbeiter: von Braunmühl**

zusammen mit den Herren: Braun, Janovsky, Kemna, Pistor, Trendelenburg, Voigt, Warnke, Weber.

Für die Benutzer von Schallaufzeichnungs- und Wiedergabegeräten ist die Kenntnis aller derjenigen physikalischen und Betriebseigenschaften der Geräte von Wichtigkeit, die für die Benutzung zu irgendeinem in der Praxis vorkommenden Zwecke von Bedeutung sein können.

Die Gesichtspunkte der Beurteilung erstrecken sich einmal auf die physikalischen Bestimmungsstücke des Verfahrens, sodann auf die Handhabung während der Aufnahme und Wiedergabe, weiterhin bei dem Transport der Apparaturen und der Schallträger und schließlich bei der Weiterverarbeitung und Verwertung der Aufnahmen. Die nachstehenden Vorschläge für eine umfassende Kennzeichnung der

Eigenschaften eines Schallaufzeichnungsverfahrens sind aus den Erfahrungen der Praxis und unter Berücksichtigung der verschiedenen heute eingeführten Verfahren ausgearbeitet worden, möglichst auch im Hinblick auf die vermutliche technische Weiterentwicklung.

## I. Allgemeine Angaben des Verfahrens und seine Anwendung

Unter diesem Punkt sind Angaben erwünscht über das vom Hersteller der Apparaturen bei der Entwicklung in Aussicht gefaßte Ziel und die gedachten Anwendungsgebiete bei kompletten Aufnahme- und Wiedergabeapparaturen (z. B. ob es sich um ein Diktiergerät, eine Expeditionsausrüstung, eine kommerzielle Anlage für sprachliche und musikalische Darbietungen handelt). Gegebenenfalls ist auf denjenigen Gesichtspunkt hinzuweisen, der der Entwicklung als Leitgedanke zugrunde lag (möglichst lange Spieldauer, möglichst geringes Gewicht, möglichst hohe Qualität). Bei Apparaturen, die nur aus dem Aufnahme- oder dem Wiedergabegerät bestehen, ist mitzuteilen, in Verbindung mit welchen Ergänzungsgeräten die Apparatur zusammenarbeiten soll.

## II. Physikalisch-Technische Eigenschaften des Verfahrens

### *a) Prinzip des Aufzeichnungsverfahrens*

Es ist eine kurze Beschreibung der Arbeitsweise des Verfahrens anzugeben. Die Beschreibung ist nach folgenden Punkten zu unterteilen:

*1. Aufzeichnungsart*

Z. B. Lichttonfilm: Optisch-photographisch in Vielfachdoppelzackenschrift.

*2. Aufzeichnungsverfahren*

Gemeint ist das Umsetzungsverfahren der elektrischen Amplitude in die Aufzeichnungsamplitude; z. B. Schallplatte: elektromagnetisch-mechanisch.

*3. Zwischenverarbeitung*

Z. B. Lichttonfilm: Chemische Verarbeitung (entwickeln, fixieren, wässern, trocknen).

Die zur Zwischenbehandlung erforderlichen Apparate sind anzugeben und zu beschreiben.

*4. Wiedergabeverfahren*

Z. B. Magnetton: Rein elektromagnetisch.

5. Angaben über die Anwendung einer Noiseless-Steuerung oder einer Dynamikpressung bei der Aufnahme mit Dynamikdehnung bei der Wiedergabe; Beschreibung der Arbeitsweise mit Angaben über Ein- und Ausschwingzeiten sowie Angaben über die statische Kennlinie.

Liegt das Übertragungssystem nicht als Ganzes (Aufnahme- und Wiedergabegerät zusammen) zur Beurteilung vor, z. B. nur das Aufnahmesystem, so sollen sich die Angaben auf die auf dem Schallträger befindliche Aufzeichnungsamplitude (Transparenzamplitude, mechanische Auslenkung, oder magnetische Amplitude) beziehen oder die Angaben sind unter der Annahme bekannter physikalischer Unterlagen des fehlenden Teils zu machen.

### *b) Frequenzkurve*

Die Frequenzkurve kennzeichnet den Verlauf des Übertragungsmaßes in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Koordinaten der Kurve sollen eine logarithmische Teilung besitzen. Die Angabe erfolgt getrennt gemäß den nachfolgenden Punkten (3 getrennte Kurvenblätter):

*1. Aufnahmegerät*

$$\text{Übertragungsmaß} = \frac{\text{Eingangs-EMK}}{\text{Aufgezeichnete Größe}}$$ unter gleichzeitiger Angabe des Generatorwiderstandes und des Eingangswiderstandes.

*2. Wiedergabe*

$$\text{Übertragungsmaß} = \frac{\text{Ausgangs-EMK}}{\text{abgetastete Größe}}$$ unter gleichzeitiger Angabe des Ausgangswiderstandes.

*3. Gesamtsystem* (Aufnahme- und Wiedergabegerät kombiniert)

$$\text{Übertragungsmaß} = \frac{\text{Ausgangs-EMK}}{\text{Eingangs-EMK}}$$ unter gleichzeitiger Angabe des Generatorwiderstandes der verwendeten Meßspannung, des Eingangswiderstandes und des Ausgangswiderstandes.

Die aufgezeichnete oder abgetastete Größe ist dem Verfahren gemäß zu wählen und als solche zu kennzeichnen (z. B. für Lichttonfilm die Transparenzunterschiede, für Magnetton die Magnetisierung, für Schallplatte der mechanische Ausschlag oder die Schnelle).

Der frequenzabhängige Verlauf des Übertragungsmaßes ist für drei Aussteuerungswerte 30, 50 und 100% anzugeben. Die Angabe 100% bezieht sich auf die für den gedachten Verwendungszweck vorgeschriebene Aussteuerung. Zur kritischen Beurteilung der Aussteuerungsgrenze sind an einigen Frequenzen (z. B. 50, 100, 1000, 5000 und 10000 Hz) die bei den Aussteuerungswerten auftretenden nichtlinearen Verzerrungen anzugeben (s. Abb. 1).

### *d) Nichtlineare Verzerrungen*

Als Maß für die nichtlinearen Verzerrungen ist der Klirrfaktor zugrunde zu legen (Effektivwert der Ober- und Unterschwingungen zu Effektivwert der Grundschwingung). Es ist der Verlauf des Klirrfaktors in Prozent in Abhängigkeit von der Aussteuerung in Prozent in linearem Maßstab für mehrere Frequenzen anzugeben (s. Abb. 2). Diese Angaben sind wichtig,

da beispielsweise Verfahren nach dem Gegentakt-B-Prinzip auch bei kleinen Amplituden große Verzerrungswerte aufweisen können.

Im Bereich der oberen Oktaven ist die Messung der nichtlinearen Verzerrung nach der üblichen Brückenmethode nicht möglich. Vielfach sind die hier auftretenden Verzerrungswerte jedoch groß, daß sie selbst bei den geringen Aussteuerungswerten der hohen Frequenzen störend in Erscheinung treten. Zur Erfassung dieser Verzerrungen ist die neuerdings in die Praxis eingeführte Doppeltonmethode geeignet. Die Handhabung der Methode und die Definition des Verzerrungsmaßes (bekannt sind Gleichrichtereffekt, Differenztonfaktor, Kombinationsfaktor und Modulationsfaktor) sind noch nicht einheitlich. Es wird vorgeschlagen, über die Anwendung der Methode und die Definition des Verzerrungsmaßes genaue Angaben zu machen. Es ist erwünscht, eine Aufteilung der Verzerrungen nach symmetrischen und unsymmetrischen Verzerrungen vorzunehmen. Die durch Aufnahme und Wiedergabe bedingten Verzerrungen sind nach Möglichkeit getrennt anzugeben, dazu getrennt die Verzerrungen der Gesamtapparatur (3 Kurvenblätter).

*e) Eigengeräusch (Störgeräusch)*

Unter Eigengeräusch ist die Stör-EMK am Ausgang des Wiedergabegerätes beim Ablauf eines nichtmodulierten aber normal behandelten Schallträgers zu verstehen. Die Größe der Stör-EMK ist in db — bezogen auf einen 1000-Hz-Ton bei Vollaussteuerung — anzugeben. Die Messung der Stör-EMK geschieht

1. als Gesamtspannung,
2. als Gesamtspannung unter Zwischenschaltung eines Ohrsiebes mit der inversen Charakteristik der Kurven gleicher Lautstärke bei 30 phon[1]), wobei die Frequenz 1000 Hz gegenüber dem Zustand ohne Ohrsieb keine Dämpfung erfährt,
3. mit einem den ganzen Frequenzbereich bestreichenden Oktavsieb zur Charakterisierung der spektralen Verteilung des Störgeräusches in Abhängigkeit von der Frequenz.

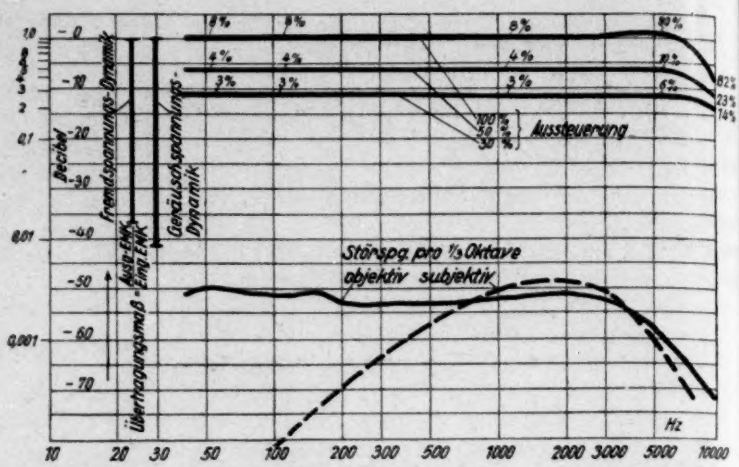



Abb. 1. Darstellungsbeispiel der Eigenschaften eines kombinierten Schallaufnahme-Wiedergabegerätes

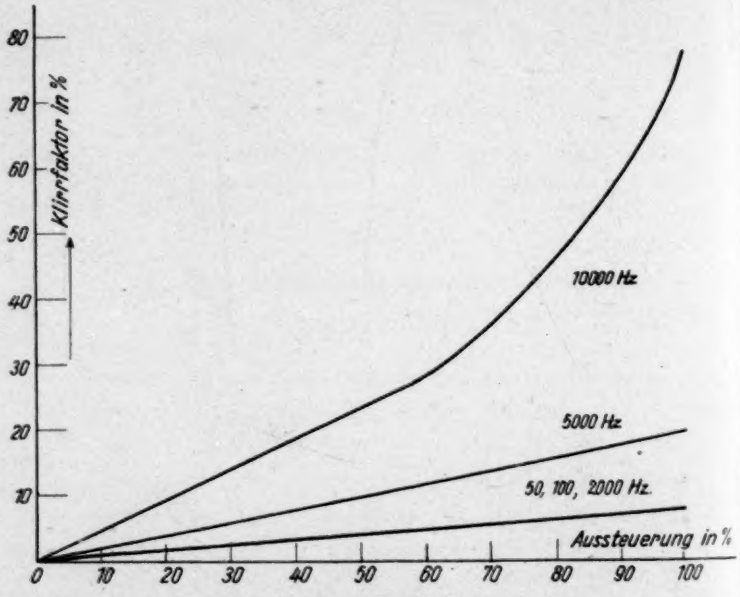



Abb. 2. Darstellungsbeispiel der Abhängigkeit nichtlinearer Verzerrungen vom Aussteuerungsgrad

Der Meßwert unter 1. ergibt die „Fremdspannungsdynamik" in db, unter 2. die Geräuschspannungsdynamik in db. Die Meßwerte unter 3. sind als Störgeräuschkurve in dem meßmäßig festgelegten Abstand von der Kurve für Vollaussteuerung einzutragen. Über die Eigenschaften des verwendeten Spannungsmessers sind Angaben zu machen (Effektiv- oder Spitzenwertmesser, Integrationszeit). Wei-

[1]) Empfohlen wird die Benutzung der Kurven des Geräuschspannungszeigers des CCIF. Siehe CCIF, Weißbuch 1934, Bd. 4, S. 258 u. 259.

terhin sind darüber Angaben zu machen, ob die Messung des Störgeräusches unmittelbar vorgenommen wurde, oder ob bei der Aufzeichnung und Wiedergabe geräuschvermindernde Einrichtungen Klartonsteuerung, Dynamikpresser, Dynamikdehner verwendet wurden.

*f) Eingangswiderstand und Ausgangswiderstand*

Für den Eingang des Aufnahmegerätes und für den Ausgang des Wiedergabegerätes ist der Verlauf des Scheinwiderstandes in Abhängigkeit von der Frequenz nach Betrag und Phase anzugeben. Bei vorhandenen Aufnahme- und Wiedergabeverstärkern bezieht sich die Angabe auf den Eingangs- bzw. Ausgangswiderstand der Verstärker. Weiterhin ist anzugeben, ob Eingang und Ausgang mit Transformatoren

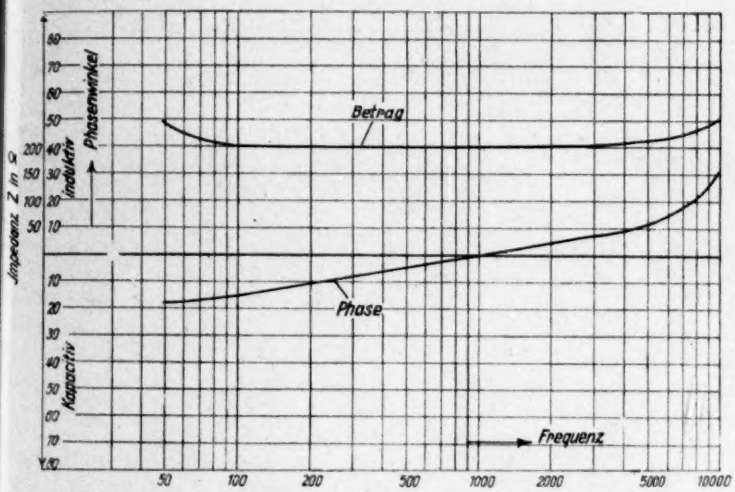



Abb. 3. Darstellungsbeispiel der Ausgangsimpedanz eines Wiedergabeverstärkers

abgeschlossen sind, ob diese Transformatoren eine Mittelanzapfung besitzen und ob die Klemmen frei von Erde sind. Für die zweckmäßigste Größe des für den Eingang vorzusehenden Generatorwiderstandes und über die Größe des zweckmäßigsten Belastungswiderstandes für den Ausgang sind ebenfalls Angaben zu machen (2 Kurven; Beispiel s. Abb. 3).

*g) Leistung der Verstärker*

Die vom Aufnahmeverstärker an das Aufzeichnungsorgan und die vom Wiedergabeverstärker abgegebenen Tonfrequenzleistungen sind unter gleichzeitiger Angabe des dabei zugrunde gelegten Klirrfaktors anzuführen.

*h) Ablaufgeschwindigkeit und Gleichlauf des Schallträgers*

Die Ablaufgeschwindigkeit des Schallträgers ist in cm/sec anzugeben. Bei plattenförmigen Schallträgern mit konstanter Drehzahl genügt die Angabe der Umdrehungszahl pro Minute. Die zu störenden Tonhöhenänderungen oder Verzerrungen führenden Gleichlaufschwankungen beim Ablauf des Schallträgers sind nach folgenden Punkten unterteilt anzugeben:

1. Die Geschwindigkeitsdifferenzen der einzelnen Geräte unter sich zur Kennzeichnung des störungsfreien Überganges von einem Gerät zum anderen;
2. Langsame Geschwindigkeitsschwankungen zwischen Anfang und Ende einer geschlossenen Einheit des Schallträgers;
3. Langsame, periodische Geschwindigkeitsschwankungen (z. B. das sog. Wabern bei Schallplatten usw. das Mittelloch exzentrisch);
4. Schnelle periodische Geschwindigkeitsschwankungen (z. B. beim Tonfilm die Rückwirkung des stoßweisen Transportes von der Bildwiedergabe).

Die Angabe der Geschwindigkeitsschwankungen soll sich sowohl auf die absolute Abweichung beziehen, als auch auf die Änderungsgeschwindigkeit. Bei indirekten Meßprinzipien zur Ermittlung der Gleichlaufstörungen (z. B. mit Hilfe der durch sie bewirkten Verzerrungen) sind Angaben über die benutzten Methoden erwünscht.

## III. Betriebseigenschaften der Geräte

*a) Gewicht und Größe der Apparatur*

Gewicht und Größe der Apparatur sind nach folgenden Gesichtspunkten anzugeben:

1. Aufnahme- und Wiedergabeapparatur getrennt,
2. Aufnahme- und Wiedergabeapparatur getrennt mit den jeweiligen Zusatzeinrichtungen,
3. Gesamtapparatur mit vollständigen Zusatzeinrichtungen.

*b) Stromart und Leistungsbedarf*

Die Angaben sollen für Aufnahme- bzw. Wiedergabegeräte und die entsprechenden Zusatzeinrichtungen getrennt erfolgen.

*1. Aufnahme bzw. Wiedergabegerät*

Es ist anzugeben, welche Stromart erforderlich ist (Gleichstrom, Wechselstrom, Drehstrom), sowie ob und in welchem Maße die Schallträgergeschwindigkeit durch die Spannung oder durch die Frequenz der Stromquelle bedingt ist (geregelter Gleichstrommotor, Synchronmotor, Asynchronmotor). Erforderliche Leistung in W und VA mit Strom- und

Spannungsangabe sowie Toleranzbereich für Frequenz- und Spannungsangaben.

*2. Zusatzeinrichtungen*

Leistungsbedarf in W und VA bei der erforderlichen Stromart mit Strom- und Spannungsangabe. Angaben über die Funktion der Zusatzeinrichtungen in Abhängigkeit von der Frequenz und Spannung. Falls mit den Schallübertragungssystemen noch andere Systeme gekoppelt sind (z. B. Bildaufnahme, Fernsehen), sind gegebenenfalls Angaben, die im Zusammenhang mit diesen Systemen stehen, zu machen (z. B. Antrieb der Bildkamera aus der Stromquelle des Tonsystems; Synchronisationsverfahren). Sofern bei transportablen Geräten Stromquellen eingebaut sind, z. B. Anoden- oder Heizbatterien, so sind diese mit anzugeben.

*c) Aufnahmedauer und Übergangsmöglichkeit*

Aufnahme- und Wiedergabedauer einer geschlossenen Einheit eines Schallträgers sind anzugeben. Beschreibung des Aufnahme- bzw. Wiedergabeverfahrens, deren Dauer das Aufnahmevermögen eines einzigen geschlossenen Schallträgers übersteigt.

*d) Empfindlichkeit gegen mechanische Erschütterungen*

Die Kennzeichnung der Empfindlichkeit gegen mechanische Erschütterungen ist für Transport- und Betriebszustand getrennt auszuführen.

*1. Transport*

Es sind Angaben zu machen, ob das Gerät für transportable oder stationäre Zwecke gedacht ist und im letzten Falle, welche Zeit für die Demontage zur Sicherung empfindlicher Teile beim Transport erforderlich ist.

*2. Betriebszustand*

Die Auswirkung mechanischer Erschütterungen auf den Aufnahme- bzw. Wiedergabevorgang ist anzugeben. In der Ermangelung der zahlenmäßigen Größe von Erschütterungen (durch ihre Geschwindigkeitsamplitude) ist anzugeben, ob bei transportablen Geräten die Aufnahme und Wiedergabe in einem fahrenden Eisenbahnwagen oder Kraftwagen möglich ist und ob bei stationären Geräten besondere Vorkehrungen zur Abhaltung von Gebäudeerschütterungen notwendig sind.

*e) Empfindlichkeit gegen atmosphärische Einflüsse*

Die Auswirkungen der atmosphärischen Einflüsse, insbesondere die der Temperatur und der Feuchtigkeit auf den Aufnahme- bzw. Wiedergabeprozeß und auf die Lebensdauer des Gerätes sind anzugeben. Die Tropenfestigkeit ist gesondert zu vermerken.

*f) Vervielfältigungsmöglichkeit*

Der Vervielfältigungsvorgang mit den erforderlichen Geräten ist allgemein zu beschreiben. Entsteht bei der Vervielfältigung eine Abnutzung der Originalaufnahme, so ist anzugeben, wieviel Vervielfältigungen von der ersten Aufnahme möglich sind und wie der Vervielfältigungsprozeß bei einer sehr großen Zahl von Vervielfältigungen geleitet werden kann. Der Einfluß des Vervielfältigungsprozesses auf die Wiedergabequalität ist mit Angabe von Toleranzbändern, innerhalb derer sich die Qualitätsverschlechterung bewegt, festzulegen. Sofern Vorschläge über eine besondere Behandlungsweise der Schallträger vorliegen (z. B. hinsichtlich Staubempfindlichkeit oder mechanischer Empfindlichkeit der Vervielfältigungsmaschinen) ist auf diese hinzuweisen.

*g) Synchronisierungsmöglichkeit*

Die Eignung des Verfahrens bei Aufnahme und Wiedergabe zur synchronen Begleitung anderer, insbesondere bildmäßiger Vorgänge. Beschreibung der zur Synchronisierung erforderlichen Zusatzeinrichtungen.

*h) Kombination von Teilaufnahmen*

Es ist anzugeben, ob und mit welchen Mitteln Teile von einzelnen Aufnahmen zu einer geschlossenen Wiedergabe zusammengefügt werden können bzw. aus einer geschlossenen Aufnahme Teile entfernt oder durch andere ersetzt werden können. Es ist im einzelnen anzugeben, ob diese Kombination eine manuelle Kunstfertigkeit des Bedienenden während der Wiedergabe selbst bedingt, oder ob der geschnittene Schallträger ein für die Wiedergabe fertiges Ganzes darstellt. Es ist zu beschreiben, ob die durch ein Stichwort festgelegte Schnittstelle optisch sichtbar ist oder mit welcher Genauigkeit und mit welchen Mitteln sie herausgefunden wird (beim Tonfilm z. B. durch optische Sicht möglich).

*i) Wiedergabebereitschaft*

Es ist zu unterscheiden zwischen Verfahren, die unmittelbar nach der Aufnahme zur Wiedergabe bereit sind und solchen, die erst einer längeren Zwischenbehandlung bedürfen. Die Mindestzeit zwischen Aufnahme und ihrer Wiedergabe ist anzugeben. Bei bandförmigen Schallträgern mit sofortiger Wiedergabebereitschaft ist im allgemeinen ein Umspulen notwendig. Es sind Angaben zu machen, wieweit dieses Umspulen auf dem Aufnahmegerät selbst erfolgen kann oder ob hierzu besondere Umspulvorrichtungen notwendig sind. Weiterhin sind Angaben zu machen, ob für das Umspulen erhöhte Geschwindigkeiten vorgesehen sind und ob die gleiche erhöhte Geschwindigkeit gegebenenfalls auch für die normale Aufnahmeeinrichtung vorgesehen ist. Diese Angaben sind für Diktiergeräte wichtig, wo es darauf ankommt, ein Stichwort nach der Aufnahme möglichst schnell herauszufinden.

*j) Lichtempfindlichkeit*

Über die Lichtempfindlichkeit des betriebsfertigen Aufnahmegerätes sind Angaben zu machen. Auf die beim Auswechseln lichtempfindlicher Schallträger zu beachtenden Vorsichtsmaßnahmen ist hinzuweisen.

*k) Aussteuerungskontrolle*

Angaben über die Art der Aussteuerungskontrolle und die für die Aussteuerungsüberwachung entwickelten Vorrichtungen, unter der Voraussetzung, daß diese als zur Apparatur gehörig angesehen werden. Es ist anzugeben, wieweit ein direktes Abhören der aufgezeichneten Modulation während der Aufnahme zur Überwachung herangezogen werden kann.

## IV. Eigenschaften des Schallträgers

*a) Allgemeine Eigenschaften*

Allgemeine Beschreibung des Schallträgers mit Angaben, ob es sich um einen plattenförmigen, bandförmigen oder sonstwie gearteten Träger handelt. Die Art der eigentlichen Tonaufzeichnungsfläche ist anzugeben, wie der Verlauf der Tonspuren auf diesem Träger angeordnet ist, ob es sich um einfache oder nebeneinandergelegte Spuren gleicher oder verschiedener Modulation handelt. Der Transport des Schallträgers im Aufnahme- und Wiedergabegerät ist zu beschreiben. Es empfiehlt sich, die Beschreibung nach folgender Aufteilung vorzunehmen:

*1. Art des Schallträgers*

Stoff und Abmessungen, z. B. Stahlbandverfahren: Spezialstahlband, 3 mm breit, 0,08 mm dick, Normalspule 2160 m lang.

*2. Transport des Schallträgers*

Z. B. Tonfilm: Mittels Zahntrommeln über eine einseitige Perforation.

*3. Tonschriftverlauf auf dem Schallträger*

Z. B. Schallfolie: Spiralige Tonspur, innerer Radius 5 cm, äußerer Radius 15 cm, 35 Rillen pro cm.

*b) Gleichförmigkeit der physikalischen Eigenschaften des Schallträgers*

Die physikalischen Eigenschaften des Schallträgers (z. B. Empfindlichkeit der photographischen Schicht, Magnetisierbarkeit usw.) pflegen in der Fabrikation zu schwanken und damit die Wiedergabebedingungen zu beeinflussen. Es sind daher Toleranzen anzugeben für diejenigen Eigenschaften, die sich erfahrungsgemäß in der Wiedergabe besonders bemerkbar machen.

*c) Empfindlichkeit gegen atmosphärische Einflüsse*

Die Einwirkung der Atmosphäre ist für Versand, Betrieb und Lagerung getrennt nach den folgenden Punkten anzugeben:

1. Temperatur,
2. Feuchtigkeit und Regen,
3. Licht,
4. Tropische Bedingungen.

*d) Empfindlichkeit gegen mechanische Beanspruchungen*

Angaben über die Empfindlichkeit der Schallträger gegen Druck, Stoß (Bruchgefahr), Kratzen (Verschrammung), Zug (Reißen); wenn nötig, Vorschriften für den Versand (Spezialkisten usw.).

*e) Feuergefährlichkeit.*

Angaben über die Brennbarkeit und den Ablauf des Verbrennungsvorganges des Schallträgers als solchem bzw. der von ihm gewonnenen Abfälle.

*f) Lebensdauer der Schallträger*

1. Lagerfähigkeit des unbenutzten Schallträgers mit Angaben der eventuell eintretenden Verschlechterung der Wiedergabequalität bzw. ob das betriebssichere Abspielen nicht in Frage gestellt ist.
2. Lagerfähigkeit des beschrifteten Schallträgers mit Angaben der eventuell eintretenden Verschlechterung der Wiedergabequalität bzw. ob das betriebssichere Abspielen nicht in Frage gestellt ist (z. B. Eignung für Archivzwecke).
3. Das Verhalten des Schallträgers gegenüber mechanischer Beanspruchung bei der Wiedergabe. Die Zahl der möglichen Wiedergaben mit Angaben über die hierbei auftretende Verschlechterung der Qualität in bezug auf Frequenzkurve, Verzerrungen und Störgeräusch. Auf die Abnutzung des Schallträgers besonders nachteilige Umstände bei der Wiedergabe sind hervorzuheben (z. B. Schüttelresonanz des Tonarmes bei Schallplatte usw.).

*g) Wiederbenutzbarkeit der Schallträger*

Es sind Angaben zu machen, wieweit es möglich ist, benutzte Schallträger, deren Aufnahmeinhalt wertlos geworden ist, durch Entfernen der Aufzeichnung für einen Wiedergebrauch bereitzumachen. Das hierfür benutzte Verfahren mit den eventuell erforderlichen Hilfsmaschinen ist zu beschreiben.

---

## Übersicht über gesetzliche Maßnahmen zur Geräuschminderung. ISA 43, UK 5

**Sachbearbeiter: E. Lübcke**

zusammen mit den Herren: Berger, Buchmann, Hartmann, Kösters, Zeller und dem Lärmminderungsausschuß beim VDI.

Teil I. Übersicht über die im Deutschen Reich geltenden Gesetze und Verordnungen zur Lärmabwehr; Angabe der einzelnen Paragraphen.

Teil II. Verordnungen zur Lärmabwehr; Wortlaut der einzelnen Paragraphen.
Teil III. Lärmabwehr in Polizeiverordnungen.
Teil IV. Deutsche Norm DIN E 4110: Zulassung neuer Bauweisen, Schallschutz.
Teil V. Geräuschabwehrvorschriften der Bausatzung 1938, Reichsmessestadt Leipzig.

Im folgenden ist zunächst eine kurze Übersicht über die rechtlichen Maßnahmen zur Lärmminderung zusammengestellt. Es ist im 2. Teil der Text der im einzelnen angezogenen Vorschriften gegeben worden. Im 3. Teil ist der Hauptinhalt der Polizeiverordnungen auf dem Gebiet des Lärmschutzes zusammengefaßt.

Um bei der Errichtung von neuen Bauten, insbesondere von neuen Bauweisen, auch den Schallschutz seiner Bedeutung entsprechend zu berücksichtigen, ist durch die Deutsche Norm DIN 4110, 2. Ausgabe vom Juli 1938: „Technische Bestimmungen zur Zulassung neuer Bauweisen", für Wohnungstrennwände ein Schallschutz vorgeschrieben, der nach dem Abschnitt 11 des Normblattes bestimmt wird. Dieser Abschnitt ist als 4. Teil angeschlossen worden. Die Bauvorschriften der verschiedenen Länder und Städte berücksichtigen auch den Schallschutz, beispielsweise die sächsische Bauordnung. Aus der vor kurzem herausgegebenen Bausatzung der Reichsmessestadt Leipzig sind die wesentlichen Punkte in Teil 5 wiedergegeben.

Es sei noch hingewiesen auf den Vortrag von Herrn Rechtsanwalt W. Körner, Berlin: „Der Lärm und seine Bekämpfung in Verwaltung und Rechtsprechung", abgedruckt in: „Lärm- und Erschütterungsabwehr im Hochbau", herausgegeben von Dr.-Ing. Dr. W. Zeller, VDI-Verlag Berlin 1937, S. 61—70. Der DIN-Vornorm-Entwurf 5a E 4150, „Erschütterungsschutz im Bauwesen", herausgegeben im April 1936, enthält Empfehlungen. Gesetzliche Vorschriften liegen noch nicht vor, weil hier die Meßmethoden und die Bewertung ihrer Ergebnisse noch stark im Fluß sind.

## Teil I

### Übersicht über die im Deutschen Reich geltenden Gesetze und Verordnungen zur Lärmabwehr

Das deutsche Recht gewährt Abwehrmittel, Strafschutz, Ausweichmöglichkeiten (Kündigung bei Mietverträgen) und Entschädigungsansprüche.

I. Allgemeine Lärmschutzvorschriften.

1. Bürgerlichrechtliche:
   §§ 862, 906, 1004 des Bürgerlichen Gesetzbuches (BGB.),
   §§ 542, 544 BGB. (Kündigung von Mietverhältnissen),
   § 823 BGB. Entschädigungsansprüche.

2. Strafrechtliche:
   § 360, Ziffer 11 des Reichsstrafgesetzbuches — Grober-Unfug-Paragraph,
   §§ 223, 230, Schutz gegen gesundheitliche Schädigungen,
   § 366, Ziffer 1, Schutz der Ruhe an Sonn- und Feiertagen,
   § 366, Ziffer 10, Schutz der Ruhe auf Wasserstraßen.

3. Allgemein-polizeirechtliche:
   § 14 des preußischen Polizeiverwaltungsgesetzes vom 1. Juni 1931 (Ges.-S. S. 77) und der ähnlich lautenden Bestimmungen der außerpreußischen Länder, ferner zahlreiche Polizeiverordnungen gegen häufiger vorkommende gesundheitschädliche Lärmstörungen.

II. Vorschriften gegen besondere Lärmarten (Verkehrs-, Betriebs-, Wohnlärm). — Besondere Ermächtigungen der Behörden:

1. Verkehrslärm:
   a) Zu Lande:
   Straßenverkehrsordnung vom 13. November 1937 (RGBl. I. S. 1179) nebst Straßenverkehrszulassungsordnung vom gleichen Tage (RGBl. I, S. 1215ff.) insbesondere §§ 1, 5, 12, 19, 21, 42 der StrVO. und §§ 47, 49 der StrVZu. 10.
   b) Zu Wasser:
   § 366 Ziffer 10 Reichsstrafgesetzbuch.
   c) In der Luft:
   Luftverkehrsgesetz vom 21. August 1936 (RGBl. I S. 653) nebst Verordnungen über den Luftverkehr vom gleichen Tage (§§ 7 II, 10 Ges. — §§ 34, 35, 37 70 VO.).

2. Betriebslärm:
   Die einschlägigen Vorschriften der Reichsgewerbeordnung und anderer Gesetze und Verordnungen über den Arbeitsschutz.

3. Wohnlärm:
   a) Baupolizeilicher Schutz:
   Zahlreiche baupolizeiliche Bestimmungen des Reiches und der Länder u. a. Reichsverordnung vom 15. Februar 1936 (RGBl. I S. 104), u. a. preußisches Wohnungsgesetz vom 28. März 1918 — Ges.-S. S. 23.
   b) Gewerbepolizeilicher Schutz:
   §§ 16ff. 27, 30 der Reichsgewerbeordnung,
   § 11 des Gaststättengesetzes vom 28. April 1930 (RGBl. I S. 146).

III. Nicht gegeben sind die Schutzmittel zu I und II i. U. gegen Lärm
   a) aus staatshoheitlicher Betätigung (z. B. Militärschießplatz);

b) von behördlich genehmigten, im öffentlichen Interesse errichteten Betrieben (Eisenbahn, Post, Kanalisation usw.);

c) in besonderen Fällen: Gesetz vom 13. Dezember 1933 (RGBl. I S. 1058) — genehmigte Volksertüchtigungsstätten — und Gesetz vom 18. Oktober 1935 (RGBl. I S. 1247) — genehmigte Volksgesundheitsstätten.

## Teil II

## Verordnungen zur Lärmabwehr

*§ 862 BGB.*

Wird der Besitzer durch verbotene Eigenmacht im Besitze gestört, so kann er von dem Störer die Beseitigung der Störung verlangen. Sind weitere Störungen zu besorgen, so kann der Besitzer auf Unterlassung klagen.

Der Anspruch ist ausgeschlossen, wenn der Besitzer dem Störer gegenüber fehlerhaft besitzt, und der Besitz in dem letzten Jahre vor der Störung erlangt worden ist.

*§ 906 BGB.*

Der Eigentümer eines Grundstückes kann die Zuführung von Gasen, Dämpfen, Gerüchen, Rauch, Ruß, Wärme, Geräusch, Erschütterungen und ähnliche von einem anderen Grundstück ausgehenden Einwirkungen insoweit nicht verbieten, als die Einwirkung die Benutzung seines Grundstücks nicht oder nur unwesentlich beeinträchtigt oder durch eine Benutzung des anderen Grundstücks herbeigeführt wird, die nach den örtlichen Verhältnissen bei Grundstücken dieser Lage gewöhnlich ist. Die Zuführung durch besondere Leitung ist unzulässig.

*§ 1004 BGB.*

Wird das Eigentum in anderer Weise als durch Entziehung oder Vorenthaltung des Besitzes beeinträchtigt, so kann der Eigentümer von dem Störer die Beseitigung der Beeinträchtigung verlangen. Sind weitere Beeinträchtigungen zu besorgen, so kann der Eigentümer auf Unterlassung klagen.

Der Anspruch ist ausgeschlossen, wenn der Eigentümer zur Duldung verpflichtet ist.

*§ 542 BGB.*

Wird dem Mieter der vertragsmäßige Gebrauch der gemieteten Sache ganz oder zum Teil nicht rechtzeitig gewährt oder wieder entzogen, so kann der Mieter ohne Einhaltung einer Kündigungsfrist das Mietverhältnis kündigen. Die Kündigung ist erst zulässig, wenn der Vermieter eine ihm von dem Mieter bestimmte angemessene Frist hat verstreichen lassen, ohne Abhilfe zu schaffen. Der Bestimmung einer Frist bedarf es nicht, wenn die Erfüllung des Vertrages infolge des die Kündigung rechtfertigenden Umstandes für den Mieter kein Interesse hat.

Wegen einer unerheblichen Hinderung oder Vorenthaltung des Gebrauches ist die Kündigung nur zulässig, wenn sie durch ein besonderes Interesse des Mieters gerechtfertigt wird.

Bestreitet der Vermieter die Zulässigkeit der erfolgten Kündigung, weil er den Gebrauch der Sache rechtzeitig gewährt oder vor dem Ablaufe der Frist die Abhilfe bewirkt habe, so trifft ihn die Beweislast.

*§ 544 BGB.*

Ist eine Wohnung oder ein anderer zum Aufenthalt von Menschen bestimmter Raum so beschaffen, daß die Benutzung mit einer erheblichen Gefährdung der Gesundheit verbunden ist, so kann der Mieter das Mietverhältnis ohne Einhaltung einer Kündigungsfrist kündigen, auch wenn er die gefahrbringende Beschaffenheit bei dem Abschluß des Vertrages gekannt oder auf die Geltendmachung der ihm wegen dieser Beschaffenheit zustehenden Rechte verzichtet hat.

*§ 823 BGB.*

Wer vorsätzlich oder fahrlässig das Leben, den Körper, die Gesundheit, die Freiheit, das Eigentum oder ein sonstiges Recht eines anderen widerrechtlich verletzt, ist dem anderen zum Ersatze des daraus entstehenden Schadens verpflichtet.

Die gleiche Verpflichtung trifft denjenigen, welcher gegen ein den Schutz eines anderen bezweckendes Gesetz verstößt. Ist nach dem Inhalt des Gesetzes ein Verstoß gegen dieses auch ohne Verschulden möglich, so tritt die Ersatzpflicht nur im Falle des Verschuldens ein.

*§ 360 Ziffer 11 StGB.*

Mit Geldstrafe bis zu einhundertfünfzig (Reichs-) Mark oder mit Haft wird bestraft, wer ungebührlicherweise ruhestörenden Lärm erregt oder wer groben Unfug verübt.

*§ 167 StGB.*

Wer durch eine Tätlichkeit oder Bedrohung jemand behindert, den Gottesdienst einer im Staate bestehenden Religionsgesellschaft auszuüben, ingleichen wer in einer Kirche oder in einem anderen zu religiösen Versammlungen bestimmten Orte durch Erregung von Lärm oder Unordnung den Gottesdienst oder einzelne gottesdienstliche Verrichtungen einer im Staate bestehenden Religionsgesellschaft vorsätzlich verhindert oder stört, wird mit Gefängnis bis zu drei Jahren bestraft.

*§ 223 StGB.*

Wer vorsätzlich einen anderen körperlich mißhandelt oder an der Gesundheit beschädigt, wird wegen Körperverletzung mit Gefängnis bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

*§ 224 StGB.*

Hat die Körperverletzung zur Folge, daß der Verletzte ein wichtiges Glied des Körpers, das Sehvermögen auf einem oder beiden Augen, das Gehör, die Sprache oder die Zeugungsfähigkeit verliert oder in erheblicher Weise dauernd entstellt wird oder in Siechtum, Lähmung oder Geisteskrankheit verfällt, ist auf Zuchthaus bis zu fünf Jahren oder Gefängnis nicht unter einem Jahre zu erkennen.

*§ 230 StGB.*

Wer durch Fahrlässigkeit die Körperverletzung eines anderen verursacht, wird mit Geldstrafe oder mit Gefängnis bis zu zwei Jahren bestraft.

War der Täter zu der Aufmerksamkeit, welche er aus den Augen setzte, vermöge seines Amtes, Berufes oder Gewerbes besonders verpflichtet, so kann die Strafe auf drei Jahre Gefängnis erhöht werden.

*§ 366 Ziffer 1 StGB.*

Mit Geldstrafe bis zu einhundertfünfzig (Reichs-) Mark oder mit Haft bis zu vierzehn Tagen wird bestraft, wer den gegen die Störung der Feier der Sonn- und Festtage erlassenen Anordnungen zuwiderhandelt.

*§ 366 Ziffer 10 StGB.*

Mit Geldstrafe bis zu einhundertfünfzig (Reichs-) Mark oder mit Haft bis zu vierzehn Tagen wird bestraft, wer die zur Erhaltung der Sicherheit, Bequemlichkeit, Reinlichkeit und Ruhe auf öffentlichen Wegen, Straßen, Plätzen oder Wasserstraßen erlassenen Polizeiverordnungen übertritt.

*§ 14 PVG.*

Die Polizeibehörden haben im Rahmen der geltenden Gesetze die nach pflichtmäßigem Ermessen notwendigen Maßnahmen zu treffen, um von der Allgemeinheit oder dem einzelnen Gefahren abzuwehren, durch die öffentliche Sicherheit oder Ordnung bedroht wird.

*§ 1 RSTVO.*

Jeder Teilnehmer am öffentlichen Straßenverkehr hat sich so zu verhalten, daß der Verkehr nicht gefährdet werden kann; er muß ferner sein Verhalten so einrichten, daß kein anderer geschädigt oder mehr als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird.

*§ 5 RStVO.*

Veranstaltungen, für die öffentliche Straßen mehr als verkehrsüblich in Anspruch genommen werden, bedürfen polizeilicher Erlaubnis.

Mehr als verkehrsüblich in Anspruch genommen werden öffentliche Straßen insbesondere durch Veranstaltungen, bei denen infolge der Zahl der Teilnehmer oder infolge schnellen Fahrens die Benutzung der Straßen für den allgemeinen Verkehr eingeschränkt wird, durch die Beförderung ungewöhnlich schwerer oder umfangreicher Gegenstände oder durch den Betrieb von Lautsprechern, der sich auf öffentliche Straßen auswirken soll.

Vor Erteilung der Erlaubnis sind die Straßenaufsichtsbehörden und Wegebaupflichtigen zu hören, wenn etwa zum Schutze der Straßen Bedingungen gestellt werden müssen.

*§ 12 RStVO.*

Der Fahrzeugführer hat gefährdete Verkehrsteilnehmer durch Warnzeichen auf das Herannahen seines Fahrzeugs aufmerksam zu machen. Es ist verboten, Warnzeichen zu anderen Zwecken, insbesondere zum Zwecke des eigenen, rücksichtslosen Fahrens und mehr als notwendig abzugeben. Die Absicht des Überholens darf durch Warnzeichen kundgegeben werden.

Die Abgabe von Warnzeichen ist einzustellen, wenn Tiere dadurch unruhig werden. Als Warnzeichen sind Schallzeichen abzugeben.

*§ 19 RStVO.*

Die Ladung eines Fahrzeuges muß so verstaut sein, daß sie niemanden gefährdet oder schädigt oder mehr als unvermeidbar behindert oder belästigt. Die Betriebssicherheit des Fahrzeugs darf durch die Ladung nicht leiden; das gilt auch bei Beförderung von Personen für deren Unterbringung und für ihr Verhalten während der Fahrt.

*§ 21 RStVO.*

Fahrräder und Schlitten müssen mit mindestens einer helltönenden Glocke ausgerüstet sein; ausgenommen sind Handschlitten. Für die Beschaffenheit und Ausrüstung der Kraftfahrzeuge gelten die Vorschriften der Straßen-Verkehrs-Zulassungsordnung vom 13. November 1937. Vorrichtungen für Schallzeichen mit einer Lautstärke über 100 Phon dürfen nur außerhalb geschlossener Ortschaften benutzt werden.

*§ 42 RStVO.*

Das Ausrufen und Anbieten gewerblicher Leistungen von Waren und dergleichen (Anreißen) auf den Straßen ist verboten. Ausnahmen kann die Verkehrspolizeibehörde für bestimmte Straßen, bestimmte Zeiten und bestimmte Zwecke zulassen (Messen, Märkte). Gestattet ist das Ausrufen von Zeitungen, Zeitschriften und Extrablättern, wenn der Verkehr dadurch nicht behindert oder belästigt wird.

Weitergehende, nicht auf verkehrspolizeilicher Grundlage beruhende Anordnungen bleiben unberührt.

*§ 47 StVZO.*

Dampf und Verbrennungsgase sind durch Schalldämpfer, die nicht ausgeschaltet werden können, so abzuführen, daß niemand innerhalb des Kraftfahr-

zeuges gefährdet oder belästigt wird. Die Mündungen von Auspuffrohren dürfen nicht auf die Fahrbahn und nicht nach rechts gerichtet sein. Bei Lastkraftwagen mit mehr als 1,5 Tonnen Nutzlast ist das Auspuffrohr bis in die Nähe der Hinterkante des Fahrzeuges und dann waagerecht nach links außen zu führen; es muß etwa mit der seitlichen Begrenzung des Fahrzeuges abschneiden.

*§ 49 StVZO.*

Das Fahrgeräusch eines Kraftfahrzeuges darf 85 Phon nicht übersteigen; es muß bei Vollbelastung des Motors und bei einer Geschwindigkeit von 40 Kilometern je Stunde (soweit diese nicht erreichbar, bei Höchstgeschwindigkeit) gemessen werden, und zwar an der Seite der Fahrbahn in 7 Meter Entfernung von der Mittellinie der Fahrzeugspur. Die Vollbelastung des Motors kann durch Beschleunigen, Bremsen, Anhängen von Schleppfahrzeugen oder in ähnlicher Weise erreicht werden.

Hat das Auspuffgeräusch eine erkennbare Richtwirkung, so darf die Lautstärke bei stehendem Fahrzeug und bei höchster Betriebsdrehzahl in 20 Meter Entfernung vom Ende des Auspuffrohres in dessen Verlängerung 85 Phon nicht übersteigen. Die Messungen sind auf freiem Platz mit möglichst glatter Oberfläche bei Windstille durchzuführen; Hindernisse (Bäume, Sträucher u. a.), die durch Widerhall oder Dämpfung stören können, müssen von der Schallquelle mindestens so weit entfernt sein wie der Schallempfänger.

Die Vorschriften in den Absätzen 1 bis 3 gelten nicht für Zugmaschinen in land- und forstwirtschaftlichen Betrieben und Arbeitsmaschinen mit eisernen Reifen und für Gleiskettenfahrzeuge ohne Gummipolsterung der Auflageflächen.

*§ 55 StVZO.*

Kraftfahrzeuge müssen eine Vorrichtung für Schallzeichen haben, deren Klang gefährdete Verkehrsteilnehmer auf das Herannahen eines Kraftfahrzeuges aufmerksam macht, ohne sie zu erschrekken und andere mehr als unvermeidbar zu belästigen. Schallzeichen müssen auch gegeben werden können, wenn die Antriebsmaschine des Kraftfahrzeugs außer Betrieb ist. Vorrichtungen für Schallzeichen (z. B. Hupen, Hörner) müssen einen in seiner Tonhöhe gleichbleibenden Klang (auch harmonischen Akkord) erzeugen, der frei von Nebengeräuschen ist. Die Lautstärke darf in 7 Meter Entfernung von der Schallquelle an keiner Stelle 100 Phon überstiegen. Für die Auswahl eines geeigneten Platzes zur Vornahme der Messung gelten die Vorschriften über Messung des Fahrgeräusches von Kraftfahrzeugen. Neben den beschriebenen Warnvorrichtungen dürfen andere Vorrichtungen für Schallzeichen, deren Lautstärke 100 Phon übersteigen kann, an Kraftfahrzeugen angebracht, aber nur außerhalb geschlossener Ortschaften benutzt werden; sie müssen mit Ausnahme sogenannter Kompressions- oder Zwitscherpfeifen in einem Akkord anklingen. Warnvorrichtungen mit einer Folge verschieden hoher Töne dürfen nur mit Genehmigung des Reichsführers SS und Chefs der deutschen Polizei im Reichsministerium des Innern geführt werden.

Die Vorschriften im Abs. 1 gelten nicht für eisenbereifte Kraftfahrzeuge mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 8 Kilometer je Stunde.

*§ 7 Abs. 2 LuftVG.*

Die für die Anlegung und den Betrieb eines Flughafens erforderliche Genehmigung ist zu versagen, wenn kein Bedürfnis besteht oder wenn Tatsachen dafür vorliegen, daß der Flughafen oder in Aussicht genommene Platz ungeeignet ist oder dafür, daß der Betrieb unzuverlässig geführt werden wird; ergeben sich später solche Tatsachen, so ist die Genehmigung zurückzuziehen.

Die vorstehenden Vorschriften gelten nicht für Reichsbetriebe, die im öffentlichen Interesse liegen.

*§ 10 LuftVG.*

Die Vorschriften des § 26 der Gewerbeordnung gelten für Flughäfen entsprechend. Dies gilt auch dann, wenn der Flughafen nicht gewerblichen, sondern öffentlichen Zwecken dient.

*§ 34 LuftVVO.*

Das Luftamt führt die Aufsicht über den Flughafen.

Das Luftamt kann zur Wahrung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung auf dem Flughafen und in dessen Umgebung Polizeiverordnungen erlassen; die Wahrnehmung dienstlicher Belange durch andere Behörden bleibt unberührt.

*§ 70 LuftVVO.*

Luftfahrzeuge dürfen geschlossene Ortschaften nur in einer Höhe überfliegen, aus der auch in Notfällen noch eine Landung auf einem Flughafen oder außerhalb der Ortschaft möglich ist. Geräuschbelästigungen sind nach Möglichkeit zu vermeiden. Großfunkanlagen dürfen nicht überflogen werden.

Bei Unsichtigkeit oder Nebel- oder Wolkenbildung kann von diesen Vorschriften unter Beachtung der durch die Umstände gebotenen Vorsicht abgewichen werden.

*§ 1 VO. über Regelung der Bebauung vom 15. Februar 1936*

Zur Regelung der Bebauung können durch Baupolizeiverordnung Kleinsiedlungsgebiete, Wohngebiete Geschäftsgebiete und Gewerbegebiete als Baugebiete ausgewiesen werden.

Für das einzelne Baugebiet ist vorzuschreiben, welche Arten von Anlagen in ihm errichtet oder nicht errichtet werden dürfen; jedoch sind in Kleinsiedlungsgebieten, Wohngebieten und Geschäftsgebieten

Anlagen, die beim Betriebe erhebliche Nachteile oder Belästigungen für die Bewohner oder die Allgemeinheit zur Folge haben können, nicht zugelassen.

*Artikel 4 § 1 Preußisches Wohnungsgesetz vom 28. März 1918*

Durch die Bauordnungen kann insbesondere geregelt werden:

2. die Ausscheidung besonderer Ortsteile, Straßen und Plätze, für welche die Errichtung von Anlagen nicht zugelassen ist, die beim Betriebe durch Verbreitung übler Dünste, durch starken Rauch oder ungewöhnliches Geräusch Gefahren, Nachteile oder Belästigungen für die Nachbarschaft oder das Publikum überhaupt herbeizuführen geeignet sind.

*§ 16 GewO.*

Zur Errichtung von Anlagen, welche durch die örtliche Lage oder die Beschaffenheit der Betriebsstätte für die Besitzer oder Bewohner der benachbarten Grundstücke oder für das Publikum überhaupt erhebliche Nachteile, Gefahren oder Belästigungen herbeiführen können, ist die Genehmigung der nach den Landesgesetzen zuständigen Behörde erforderlich.

Es gehören dahin u. a.
Hammerwerke, Fabriken, in welchen Dampfkessel oder andere Blechkessel durch Vernieten hergestellt werden, die Fabriken, in welchen Röhren aus Blech durch Vernieten hergestellt werden, Anlagen zur Erbauung eiserner Schiffe, zur Herstellung eiserner Brücken oder sonstiger eiserner Baukonstruktionen.

*§ 26 GewO.*

Soweit die bestehenden Rechte zur Abwehr benachteiligender Einwirkungen, welche von einem Grundstück aus auf ein benachbartes Grundstück ausgeübt werden, dem Eigentümer oder Besitzer des letzteren eine Privatklage gewähren, kann diese Klage einer mit obrigkeitlicher Genehmigung errichteten gewerblichen Anlage gegenüber niemals auf Einstellung des Gewerbebetriebs, sondern nur auf Herstellung von Einrichtungen, welche die benachteiligende Einwirkung ausschließen oder, wo solche Einrichtungen untunlich oder mit einem gehörigen Betriebe des Gewerbes unvereinbar sind, auf Schadloshaltung gerichtet werden.

*§ 27 GewO.*

Die Errichtung oder Verlegung solcher Anlagen, deren Betrieb mit ungewöhnlichem Geräusche verbunden ist, muß, sofern sie nicht schon nach den Vorschriften der §§ 16 bis 25 der Genehmigung bedarf, der Ortspolizeibehörde angezeigt werden.

Letztere hat, wenn in der Nähe der gewählten Betriebsstätte Kirchen, Schulen oder andere öffentliche Gebäude, Krankenhäuser oder Heilanstalten sind, deren bestimmungsmäßige Benutzung durch den Gewerbebetrieb auf dieser Stelle eine erhebliche Störung erleiden würde, die Entscheidung der höheren Verwaltungsbehörde darüber einzuholen, ob die Ausübung des Gewerbes an der gewählten Betriebsstätte zu untersagen oder nur unter Bedingungen zu gestatten sei.

*§ 28 GewO.*

Die höheren Verwaltungsbehörden sind befugt, über die Entfernung, welche bei Errichtung von durch Wind bewegten Triebwerken von benachbarten fremden Grundstücken und von öffentlichen Wegen innezuhalten ist, durch Polizeiverordnungen Bestimmung zu treffen.

*§ 11 Gaststättengesetz*

Dem Inhaber einer Gast- oder Schankwirtschaft können von der für die Erlaubniserteilung zuständigen Behörde bei Erteilung oder auf Antrag der Polizeibehörde nach Erteilung der Erlaubnis Auflagen gemacht werden:

a) zum Schutze der Gäste, Angestellten und Arbeiter gegen Gefahren für Leben, Gesundheit oder Sittlichkeit;
b) zum Schutze der Bewohner des Grundstückes und der Nachbargrundstücke sowie der Bevölkerung gegen erhebliche Nachteile oder Belästigungen.

*Gesetz über die Beschränkung von Nachbarrechten vom 13. Dezember 1933*

§ 1. Gegenüber einem Betrieb, der wegen seiner besonderen Bedeutung für die Volksertüchtigung von dem Reichsminister des Innern genehmigt worden ist, werden die nachbarrechtlichen Ansprüche in folgender Weise eingeschränkt: Der Eigentümer oder Besitzer eines Grundstückes, das durch Einwirkungen des Betriebs beeinträchtigt wird, kann nicht verlangen, daß der Betrieb eingestellt wird. Er kann auch nicht verlangen, daß Einrichtungen hergestellt werden, die eine nachteilige Einwirkung ausschließen oder mindern. Ob und inwieweit ihm eine Entschädigung zu gewähren ist, bestimmt sich nur nach den Vorschriften des § 2. Ansprüche, die auf einem besonderen bürgerlich-rechtlichen Titel, insbesondere auf Vertrag oder auf unerlaubter Handlung beruhen, bleiben unberührt.

§ 2. Vor der Entscheidung über die Genehmigung ist zu prüfen, ob der Betrieb Gefahren, erhebliche Nachteile oder Belästigungen für die Allgemeinheit oder Besitzer benachbarter Grundstücke verursachen kann. Bejahendenfalls ist weiter zu prüfen, ob den Betroffenen mit Rücksicht auf den Wert, den der Betrieb für die Volksertüchtigung hat, zuzumuten ist, solche Nachteile zu dulden.

Sind die Nachteile, die dem Eigentümer oder Besitzer erwachsen, zu erheblich, daß sie ihm trotz der Rücksicht, die der Einzelne auf das Gemeinwohl

zu nehmen hat, ohne Entschädigung nicht zugemutet werden können, so kann eine eventuelle Auflage dahin gehen, daß ihm eine Entschädigung zu gewähren ist. Die Höhe und Art der Entschädigung bestimmt der Reichsminister des Innern. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

*Gesetz über die Beschränkung von Nachbarrechten vom 18. Oktober 1935*

§ 1. Das Gesetz über die Beschränkung der Nachbarrechte gegenüber Betrieben, die für die Volksertüchtigung von besonderer Bedeutung sind (vom 13. Dezember 1933), findet sinngemäße Anwendung auf Anstalten und Einrichtungen, die für die Volksgesundheit von besonderer Bedeutung sind (Krankenhäuser, Heilanstalten, Genesungsheime, Bade- und Kuranstalten) und von dem Reich, den Ländern, den Gemeinden oder sonstigen unter Aufsicht des Reichs oder der Länder stehenden Körperschaften oder Anstalten des öffentlichen Rechts betrieben werden.

## Teil III

### Lärmabwehr in Polizeiverordnungen

Verbot geräuschvoller Arbeit an Sonn- und Feiertagen.

Musizierverbot auf öffentlichen Straßen.

Verbot des Teppichklopfens zu bestimmten Tageszeiten.

Geräusch- und Hupverbot in den Kurvierteln einzelner Badestädte.

Dasselbe für die Nähe und Umgebung von Schulen, Krankenhäusern usw.

Schutzbestimmungen für die Nachbarschaft bei Anlage privater Schießstände.

Verbot des Singens und Lärmmachens auf öffentlichen Straßen von einer bestimmten Abendstunde ab.

Verbot geräuschvoller Unterhaltung, Musizierens oder Singens in Wirtschaften nach Verkündung der Polizeistunde.

Verbot des Kegelns von einer bestimmten Abendstunde ab.

Verbot des Schallzeichengebens oder Motorlaufenlassens in Garagen in ruhegeschützten Stadtteilen oder Wohnvierteln. Beispielsweise bestimmt § 77 der Polizeiverordnung über die Regelung des Verkehrs und die Aufrechterhaltung der Ordnung in den Straßen Berlins vom 21. November 1930:

Das Musizieren auf der Straße ist verboten. Dies gilt nicht für geschlossen marschierende Abteilungen der Reichswehr.

Es ist ferner verboten, in Gärten, Vorgärten und auf anderen offenen Grundstücken, in offenen Hallen, Veranden, auf Balkonen usw. Musik zu machen, laut zu singen oder in anderer Art lautes Geräusch zu verursachen, falls hierdurch nach Lage der Örtlichkeit eine Störung der Ruhe und Ordnung auf der Straße zu erwarten ist.

Das gleiche gilt für geschlossene Räume an der Straße, insbesondere Wohnungen, Gastwirtschaften und Verlaufsstellen.

Ausnahmen von diesen Bestimmungen bedürfen der polizeilichen Erlaubnis.

Andere Verordnungen hier aufzuzählen, würde zu weit führen, da der Wortlaut in den einzelnen Gemeinden verschieden ist. Außerdem gründen alle Polizeiverordnungen auf irgendwelchen von den ganz oben erwähnten Gesetzen oder Verordnungen, die dann von der Polizei nochmals spezialisiert werden in ihren Verordnungen für bestimmte Bezirke.

## Teil IV

### Deutsche Norm DIN E 4110

*11. Schallschutz*

Der Schallschutz ist in einer Versuchsanstalt durch Versuche an Bauteilen in der vorgesehenen Ausführung festzustellen. Die etwa quadratischen Probestücke müssen bei Wänden mindestens 4 m², bei Decken 8 m² groß sein. Als Fugen- und Putzmörtel ist bei den Probestücken Kalkzementmörtel nach DIN 1053 zu verwenden. Ist für die Bauweise jedoch Zementmörtel vorgesehen, so ist dieser zu verwenden. Probestücke aus Mauerwerk und verputzte Wand- oder Deckenstücke sind 2 bis 3 Wochen nach der Herstellung zu prüfen.

Der Feuchtigkeitsgehalt der einzelnen Bestandteile ist unmittelbar nach dem Versuch festzustellen und anzugeben.

a) Luftschall

Die Schalldämmung wird nach der Beziehung $10 \log_{10} \frac{N_1}{N_2}$ in dezibel (db) bestimmt. $N_1$ bezeichnet dabei die auf die Wand aus allen Richtungen auffallende Schalleistung. $N_2$ ist die auf der anderen Seite abgegebene Schalleistung.

Es ist zwischen zwei Hallräumen (Rauminhalt je etwa 100 m³) zu messen. Die Schallempfänger sind etwa in Raummitte anzuordnen. Die Schalldämmzahl wird dann

$$D = 20 \log \frac{p_1}{p_2} - 10 \log \frac{A}{F},$$

wobei $p_1$ und $p_2$ den Schalldruck im Sende- bzw. Empfangsraum, $A$ die gesamte Schallschluckfläche des Empfangsraums und $F$ die Fläche der Versuchswand bedeuten.

Die Untersuchung ist mit Heultönen (Heulbreite $\pm$ 50 Hz) durchzuführen. Der Schalldruck ist mit einem selbstschreibenden Gerät für alle Frequenzen zwischen 100 und 3000 Hz zu bestimmen. Das hierbei

für die verschiedenen Frequenzen gefundene Ergebnis ist im Zeugnis zeichnerisch darzustellen.

Die Schallschluckfläche ist für denselben Frequenzbereich durch die Messung der Nachhallzeit zu ermitteln.

Für den Frequenzbereich von 100 bis 550 Hz ist eine mittlere Dämmzahl von mindestens 42 db, für den Bereich von 550 bis 3000 Hz eine solche von mindestens 54 db, im Mittel für beide Bereiche eine solche von mindestens 48 db zu verlangen. (Bei Decken enthalten die geforderten Werte einen Sicherheitszuschlag von etwa 2 db.)

Die Schalldämmzahl mehrschaliger Wände und Decken ist stets durch den Versuch zu ermitteln; eine Berechnung der Schalldämmung aus den Dämmzahlen der Einzelschalen ist unzulässig.

b) Trittschall[1])

Das zu untersuchende Deckenstück wird etwa in der Mitte mit einem Hammerwerk erregt, dessen 5 Hämmer mit je 1 cm dicker, schwachballiger Buchenholzaufschlagfläche und je 500 g Gewicht aus 4 cm Höhe mit einer Frequenz von etwa 10 Hz frei auf die zu untersuchende Decke herabfallen. Bedeuten $L$ die im Raum unter der Decke herrschende Lautstärke in Phon und $A$ die Schallschluckfläche dieses Raumes im mittleren Tonhöhenbereich (etwa 600 bis 1200 Hz), so ist die Normtrittlautstärke des Hammerwerks $T = L + 10 \log A$ (in Phon). Sie ist damit auf einen Empfangsraum von 1 m² Schallschluckfläche bezogen. Die Lautstärke ist mit einem objektiv anzeigenden Gerät zu messen.

Die so gemessene Normtrittlautstärke darf nicht mehr als 85 Phon betragen (neuer Bezugspunkt 0,0002 dyn/cm² für 1000 Hz)[2]). Die durch gewöhnliches Gehen mit verschiedenem Schuhwerk verursachte Lautstärke liegt hierbei zwischen 25 und 45 Phon

## Teil V

Die Bausatzung 1938 der Reichsmessestadt Leipzig bringt folgende allgemeine Geräuschabwehrvorschriften:

§ 34 Abs. 2: „Der Schutz gegen belästigende Geräusche soll in bewohnten Gebäuden im allgemeinen dem gleichen Schutz entsprechen, den eine 1 Stein starke Ziegelmauer bietet. Dies gilt insbesondere für Wohnungstrennwände. Zum Schutz gegen Schallübertragung von Geschoß zu Geschoß sind die Scheidewände unter 25 cm Stärke durch geeignete Dämmzwischenlagen akustisch zu trennen."

Abs. 3: „Als belästigende Geräusche sind auch solche anzusehen, die durch Wasserzu- und -abflußleitungen verursacht werden."

§ 44 Abs. 2: „Über oder neben Zugängen, Ein- und Durchfahrten liegende Wohn- oder Arbeitsräume sind gegen Abkühlung durch geeignete Baustoffe so zu sichern, daß Wände, Fußboden und Decke einen gleichen Schutz gewähren wie eine $1^1/_2$ Stein starke Wand. Ferner sind Wände und Decke schallsicher abzudämmen."

§ 69 Abs. 2: „Bei Bau- und Abbrucharbeiten sind unnötige Belästigungen der Nachbargrundstücke durch Staub, geräuschvolles Arbeiten, Maschinenbetrieb, Lärmen usw. zu vermeiden."

§ 53 Abs. 3: „Wird an Stelle von Zwischenböden (Fehlböden) in anderer Weise für Schall- und Wärmedämmung gesorgt, so bedarf es hierzu der baupolizeilichen Zustimmung."

Auf Geräuschbelästigungen durch Kegelbahnen geht die Bausatzung in § 34 näher ein. Es heißt dort in

Abs. 4: „Kegelbahnen dürfen in oder unmittelbar neben Wohngebäuden nicht angelegt werden, ebenso nicht in der Nähe von Kirchen, Schulen, Krankenhäusern, Heilanstalten oder ähnlichen Gebäuden, wenn die bestimmungsgemäße Benutzung dieser Gebäude oder Anstalten durch sie erheblich gestört würde."

Abs. 5: „Um Geräuschbelästigungen durch Kegelbahnen zu verhüten, ist der harte Belag ihrer Rollbahn zu beiden Seiten durch eine breite Fuge von den Umfassungen zu trennen und ebenso wie die Auflagepfoste und das Kegelbrett auf einen Untergrund zu verlegen, der den Schall weder verstärkt noch weiterleitet. Der Kugelfang nebst Rückwand sind dicht auszupolstern. In der Rücklaufrinne müssen die Kugeln auf scharfen Kanten rollen; der Auslauf dieser Rinne ist so auszubilden, daß Geräusche möglichst vermieden werden."

Über den Schutz gegen Verkehrserschütterungen wird in § 45 Abs. 2 gesagt:

„Bei Bauten an Verkehrsstraßen (insbesondere bei Eck- und Kopfhäusern) und solchen, die Straßeneinmündungen gegenüberliegen, ist auf die Standsicherheit gegen Verkehrserschütterungen besondere Rücksicht zu nehmen."

---

[1]) Hiervon und vom Luftschall ist der Körperschall zu unterscheiden, der nur am fertigen Bauwerk gemessen und nur durch bauliche Maßnahmen beeinflußt werden kann. Bei der Ziegelbauweise nimmt die Körperschallstärke je Stockwerk um etwa 20 db ab.

[2]) Dies entspricht einer Normtrittlautstärke von etwa 80 Phon für den alten Bezugspunkt von 0,000313 dyn/cm² für 1000 Hz.

# PATENTSCHAU

Bearbeitet von Heinrich Kösters

94.

*Deutsches Patent Nr. 666091, patentiert ab 1. 10. 1936, ausgegeben am 9. 9. 1938*

Willem, Peter, Hendrick Cox in Venlo (Niederlande)

**Verfahren zum Aufzeichnen von Schwingungen**

Bekanntlich kann eine photographische Schicht durch Druck geschwärzt werden. Hierauf baut sich ein Aufzeichnungsverfahren auf, bei dem durch eine Schneide, deren Auflagedruck durch die Tonfrequenz gesteuert wird, eine Tonspur hervorgerufen wird. Dieses Verfahren soll dahin abgewandelt werden, daß nicht der Auflagedruck, sondern die Breite der Schneide geändert werden.

95.

*Deutsches Patent Nr. 666178, patentiert ab 6. 7. 1930, ausgegeben am 17. 10. 1938*

Submarine-Signal-Company in Boston Mass., VStA.

**Einrichtung zur Messung eines Zeitraumes**

Das Patent beschreibt ein Echolot-Verfahren, bei dem die jeweilige Flugzeughöhe oder Wassertiefe dauernd durch einen Zeiger angezeigt wird. Hierzu wird beim Anschlagen einer Membran, die ein akustisches Signal gibt, gleichzeitig die Entladung eines Kondensators über einen festen Widerstand eingeleitet. Beim Eintreffen des reflektierten Schalles wird der Kondensator, dessen restliche Ladung ein Maß für die Laufzeit des Schalles ist, kurzzeitig mit einem zweiten Kondensator verbunden. Dieser Kondensator nimmt die Ladung des ersten Kondensators bis zum Ausgleich der Spannungen auf. Die Spannung des zweiten Kondensators wird nun mit einem Röhrenvoltmeter gemessen, dessen Ableitungswiderstand sehr hoch ist. Die Anzeige des Röhrenvoltmeters bleibt also konstant bis zum Eintreffen eines neuen Signals, das dem Kondensator eine neue größere oder kleinere Spannung vermittelt.

96.

*Deutsches Patent Nr. 666190 (Zusatzpatent), patentiert ab 11. 4. 1933, ausgegeben am 13. 10. 1938*

Radio Corporation of America in New York, VStA.

**Gehäuse mit eingebautem Flächenlautsprecher nach Patent 624049**

Nach dem Hauptpatent sollen in dem Gehäuse eines Lautsprechers eine Anzahl von HELMHOLTZschen Resonatoren angebracht werden, die durch Öffnungen mit dem Hohlraum hinter der Membran verbunden sind. Diese Resonatoren sollen so abgestimmt werden, daß die Resonanzen in dem Hohlraum gedämpft werden. Nach dem Zusatzpatent sollen zur genaueren Kompensierung der Gehäuseresonanzen die Durchtrittsflächen der Öffnungen, die zu diesen Resonatoren führen, veränderlich sein.

97.

*Deutsches Patent Nr. 666 905, patentiert ab 7. 4. 1933, ausgegeben am 31. 10. 1938*

Atlas-Werke AG. in Bremen, Dr. F. W. Kallmeyer

**Nach dem Magnetostriktionsprinzip wirkendes Schwingungsgebilde für Unterwasserschallsender bzw. -empfänger**

Zur Erhöhung des Wirkungsgrades eines nach dem Magnetostriktionsprinzip arbeitenden Unterwasserschallsenders soll nach dem Patent im wesentlichen der Teil des schwingenden Körpers einer Wechselmagnetisierung unterworfen werden, in dem die Dehnungsamplitude am größten ist. Eine mögliche Ausführungsform ist in Abb. 1 dargestellt. Der schwingende Körper (9) wird hierbei durch die beiden Joche (11) in einer Oberschwingung angeregt. Die Stelle größter Dehnungsamplitude liegt in der Mitte zwischen den beiden Ansatzpunkten der Joche.

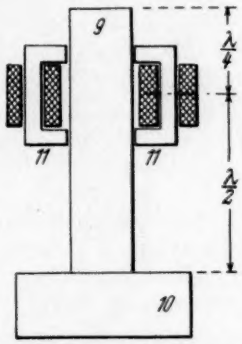



Abb. 1. Magnetostriktionssender

98.

*Deutsches Patent Nr. 667 072, patentiert ab 15.11.1932, ausgegeben am 3. 11. 1938*

Dr. Hans Joachim von Braunmühl und Walter Weber in Berlin-Charlottenburg

**Verfahren zur mechanischen Schallaufzeichnung**

Das Patent schützt die Verwenduug eines Mehrfachstichels zur mechanischen Schallaufzeichnung auf Film (Philips-Miller-Verfahren). Hierdurch wird ebenso wie bei optischen Mehrzackenschriften eine bessere Aufzeichnung der hohen Frequenzen erzielt.

99.

*Deutsches Patent Nr. 667 240, patentiert ab 10. 9. 1935, ausgegeben am 1. 11. 1938*

Klangfilm G. m. b. H. in Berlin, Dr. Heinrich Weber

**Herstellung geräuscharmer Tonfilme**

Das Patent beschreibt eine einfache Einrichtung zur Aufzeichnung von Tonfilm mit Reintonsteuerung. Es wird ein B-Verstärker benutzt, dessen im Anodenkreis fließender Gleichstrom zur Reintonsteuerung dient. Hierdurch wird ein besonderer Gleichrichter überflüssig.

100.

*Deutsches Patent Nr. 666 953 patentiert ab 15. 3. 1931, ausgegeben am 1. 11. 1938*

Tobis Tonbild Syndikat in Berlin

**Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen, Kopieren und Wiedergeben von Lichttonaufzeichnungen**

Man kann bekanntlich die Frequenzkurve eines Lichttongerätes durch Verbreiterung des Spaltes in den hohen Frequenzen abfallen lassen. Bei diesem Verfahren tritt jedoch gleichzeitig eine Änderung der aufgezeichneten Intensität ein. Um diesen Fehler wieder auszugleichen, werden verschiedene Verfahren z. B. gleichzeitige Änderung der Zellenempfindlichkeit u. ä. vorgeschlagen.

101.

*Deutsches Patent Nr. 667 495, patentiert ab 9. 7. 1935, ausgegeben am 12. 11. 1938*

Telefunken Gesellschaft für drahtlose Telegraphie m. b. H., Berlin

**Verfahren zur Herabsetzung der Eigenschwingungszahl auf einen festgelegten Sollwert von nach dem Pappengaß bzw. Schöpfverfahren hergestellten Lautsprechermembranen**

Zur Veränderung der Eigenschwingung von Lautsprechern mit Konusmembran wird vorgeschlagen, in der Nähe des äußeren Randes kleine radiale oder randparallele Schlitze anzubringen. Die Breite dieser Schlitze soll so klein sein, daß kein akustischer Kurzschluß bei tiefen Frequenzen eintritt.

102.

*Deutsches Patent Nr. 668 567, patentiert ab 11. 3. 1932, ausgegeben am 6. 12. 1938*

Electroacustic G. m. b. H. in Kiel

**Unterwasserschallempfänger**

Ein elektromagnetischer Unterwasserschallempfänger wird angegeben, bei dem die Grundresonanz unterhalb der größten Ohrempfindlichkeit (unter 400 Hz) liegt und bei dem alle höheren Teilresonanzen im Gebiete von 600 bis 2000 Hz möglichst unterdrückt werden. Dies geschieht vor allem durch Aufbringen von radialen Rippen auf die Membran und durch Metallplatten, die unter Zwischenschaltung eines Dämpfungsmittels auf die Membran gekittet werden.

103.

*Deutsches Patent Nr. 668 943, patentiert ab 28. 6. 1935, ausgegeben am 12. 12. 1938*

Electroacustic G. m. b. H. in Kiel

**Wassertelefonieeinrichtung**

Bei den Einrichtungen zur Trägerfrequenztelefonie mit Unterwasserschall ist im allgemeinen die Resonanzbreite des Empfängers schmal gegenüber

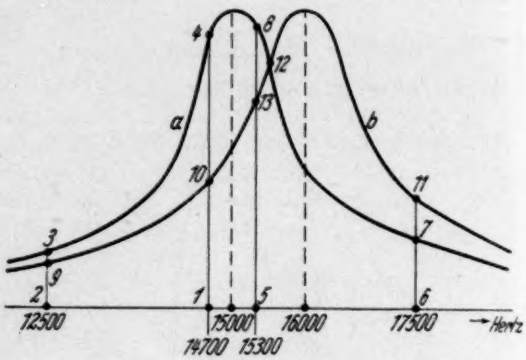



Abb. 2. Verlauf der Seitenbänder bei verschobener Abstimmung

dem zu übertragenden Frequenzband, da die Trägerfrequenz (10000 bis 20000 Hz) in großer Nähe der Sprachfrequenz liegt. Der Empfänger unterdrückt deshalb die hohen Frequenzen sehr stark. Um die Wiedergabe zu verbessern, wird vorgeschlagen, die Abstimmung des Empfängers etwas (z. B. um 1000 Hz) gegenüber der Abstimmung des Senders zu verschieben. In Abb. 2 sind als Beispiel die Verhältnisse bei einer Trägerfrequenz von 15000 Hz und einem Sprachfrequenzbereich von 300 bis 2500 Hz dargestellt, Für gleiche Abstimmung von Sender und Emfänger gilt die Kurve a), für verschobene Abstimmung die Kurve b). Der übertragene Frequenz- und Amplitudenbereich wird im ersten Falle durch die Linien 1—2—3—4 und 5—6—7—8, im zweiter. Falle durch die Linien 1—2—9—10 und 5—6—11—12—13 umschlossen. Das übertragene Frequenzband ist bei der Verstimmung des Empfängers etwas ausgeglichener.

104.

*Deutsches Patent Nr. 669 549, patentiert ab 13. 12. 1933, ausgegeben am 29. 12. 1938*

Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft in Berlin

**Horchgerät mit paraboloidisch ausgebildetem Schallsammlungssystem**

Zur Ortung von Schallquellen sind parabolische Schallsammler nach Abb. 3 (Querschnitt) bekannt. Der Brennpunkt (23) des Schallsammlers (1) bildet hierbei gleichzeitig einen Brennpunkt eines durch die Linie (2) angedeuteten Rotationselipsoides, in dessen zweitem Brennpunkt (24) der Schall abgehört wird. An der Stelle des Brennpunktes (23) liegt eine Blende (25), deren Öffnung für die Richtschärfe maßgebend ist. Nach dem Patent soll diese Durchtrittsöffnung zur Veränderung der Richtschärfe aus einer einstellbaren aus schalldämpfendem Material bestehenden Blende hergestellt werden.

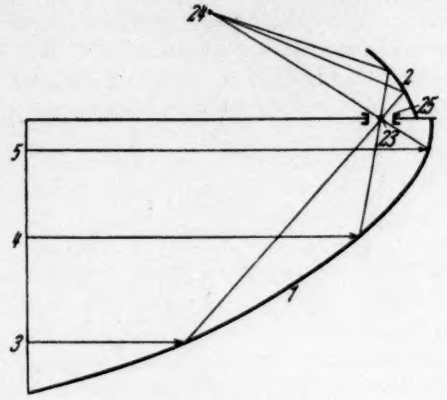



Abb. 3. Horchgerät

# SCHRIFTTUM

**Sämtliche in diesem Heft besprochenen oder vom Verlag angezeigten Bücher sind in allen deutschen Buchhandlungen zu erhalten**

G. Panconcelli-Calzia, **Phonetik und Kultur.** Mit 19 Abb. Hansischer Gildenverlag, Hamburg 11 1938. Preis RM 5,—.

In ebenso unterhaltender wie geistvoller Weise stellt der Verf. die Beziehungen zwischen phonetischer Wissenschaft und Kunst an Hand einiger herausgegriffener Beispiele dar. Es wird geschildert, wie in bekannten Gemälden und Plastiken älterer und neuerer Meister das Ziel der Darstellung lebendig wirkenden Sprechens mehr oder weniger wirkungsvoll erreicht wird. Die Schwierigkeiten sind einerseits dadurch bedingt, daß nur eine Phase aus einer Folge von Bewegungen festgehalten werden kann. Andererseits sind derselben Phase der Mundstellung eine ganze Reihe von Lauten zuzuordnen. Die auf den Beschauer erzielte Wirkung steigert sich durch Zufügung von Gebärden der abgebildeten Personen. Leonardo da Vincis Meinung, man brauche nur die Bewegungen und Stellungen von Taubstummen zu beobachten und im Bilde zu verwerten, erweist sich wegen der neueren Erkenntnisse über die Taubstummensprache als unrichtig. Immerhin ist Leonardos Ausführungen über den Gegenstand zu entnehmen, daß neben dem Ausdruck des Redenden der der mitabgebildeten Angeredeten von gleicher Wichtigkeit ist. Verf. weist diese Erkenntnis an Hand von Kinoaufnahmen nach, wobei der Betrachter ein eindeutiges Bild von der Richtigkeit der Behauptung erhält. Anschließend werden einige phonetisch interessante Kunstwerke besprochen. Aus der Fülle des Gebotenen seien die singenden Engel des Genter Altars, die eindrucksvollen Gruppen von Niccolò dell' Arca und Guido Mazzoni, das bekannte Abendmahl von Leonardo da Vinci, die drastischen Gemälde Adriaen Brouwers herausgegriffen. Gegen diese Darstellungen werden auch phonetisch negativ wirkende gestellt, darunter einige deutscher Romantiker. Die Zeichnungen Wilhelm Buschs, von Honoré Daumier und die des modernen Malers Robert Högfeld wirken phonetisch in starkem Maß positiv.

Gegenstand des zweiten Aufsatzes bildet die Geschichte der Stimmgabel. Nach dem Werk: A General History of the Science and Practice of Music verfaßt von John Hawkins 1719—1789, ist John Shore der Erfinder der Stimmgabel (Anfang 18. Jahrhundert). Shore wär „Serjeant Trumpeter" und benutzte die Stimmgabel bereits dazu, seine Laute einzustimmen. Weitere Verwendung fand dann später die Gabel für die Zeitschreibung. Helmholtz benutzte als erster elektromagnetisch erregte Gabeln. 1864 veröffentlichte Donders Schwingungsaufzeichnungen der menschlichen Sprache mit gleichzeitiger Stimmgabelaufzeichnung als Frequenznormal.

Das Thema des dritten Aufsatzes lautet: Die Phonetik im Spiegel von Marinos Adone. Ein Kuriosum aus der Barockzeit. G. B. Marino schildert in seinem Gedicht, das 40984 elfsilbige Verse umfaßt, das Liebesabenteuer von Venus und

Adonis sowie dessen Ende auf der Eberjagd. In dieses Gedicht fügt MARINO, der Sitte der Zeit entsprechend, möglichst ausgedehnte, weitschweifige Werke zu verfassen, alles ein, was mit dem Stoff zusammenhängt, und wenn es noch so lose ist. So hören wir von dem inneren Bau des Ohres, von der Stimme und den Sprachlauten. Der Mund und die Nase und deren Funktion werden an anderer Stelle erläutert. Insbesondere finden die eigentümlichen phonetischen Reaktionen seelischer Eindrücke ihre richtige Darstellung.

Über die Entstehung und Entwicklung der Sprechschreibmaschine handelt der letzte Aufsatz. Ansätze, um Vorrichtungen zu schaffen, die gesprochenes Wort sofort in gedrucktes umsetzen, sind schon mehrfach gemacht worden. An einer befriedigenden Lösung fehlt es aber bis heute. Zwei Arten von Maschinen werden vom Verfasser unterschieden; solche Anordnungen, „die Stimme und Laute faßt, wenn sie den menschlichen Körper des Phonierenden verlassen haben und der Luft, als Ergebnis der erwähnten Bewegungen, anvertraut werden" („gennemisch"). Eine Schreibmaschine auf „genetischer" Grundlage müßte die Bewegungen des Brustkorbes, des Kehlkopfes usw. erfassen.

Bemerkenswerter Vertreter der letzteren Art ist der Glossograph von GENTILLI, der auch in der Ausführung von 1908 abgebildet ist. Typische Bewegungen der Phonationsorgane wurden auf 6 nebeneinanderlaufende Linien abgebildet, wobei der Druckverlauf durch eine Nasenolive, die Bewegungen des Kehlkopfes, der Zunge und Lippen markiert wurden. Anordnungen, den Schwingungsverlauf im Schallfeld für eine Schreibmaschine auszuwerten, sind bisher fehlgeschlagen. LOTTERMOSER

**Literaturzusammenstellungen aus dem Gebiet der technischen Mechanik und Akustik.** Hrsg. von W. ZELLER, VDI. **Heft 6: Lärmabwehr und Raumakustik.** Bearbeitet für den Fachausschuß für Lärmminderung des VDI von G. ZELLER. In Kommission beim VDI-Verlag, Berlin 1938. 22 S., Format DIN A 4. Preis broschiert RM 3,20.

Das vorliegende Literaturverzeichnis setzt die vorher erschienenen ähnlichen Hefte fort; es umfaßt 613 in- und ausländische Arbeiten. Diejenigen über Lärmabwehr stammen aus der Zeit seit 1933, diejenigen über Raumakustik aus der Zeit seit 1934. Gliederung des Inhalts: I. Physikalische Grundlagen, zusammenfassende akustische Arbeiten. II. Akustische Einheiten, Lautstärke. III. Akustische Meßgeräte und Meßverfahren. IV. Physiologische und hygienische Fragen. V. Allgemeine Lärmabwehr (Rechtsfragen und Propaganda). VI. Schalldämmstoffe. VII. Lärmabwehr im Bauwesen. VIII. Lärmabwehr im Verkehrswesen. IX. Lärmabwehr im Maschinenwesen. X. Raumakustik. XI. Zur Geschichte der Akustik und der Lärmabwehr. Die Zusammenstellung leistet wertvolle Dienste bei der Suche nach Literatur über die genannten Gebiete. A. SCHOCH

ELIAS KLEIN, **Absolute Sound Intensity in Liquids by Spherical Torsion Pendula.** (Naval Research Lab., Washington, D C). J. Acous. Soc. Am. 9 (April 1938), S. 312.

Die Arbeit behandelt die Anwendung eines Kugel-Torsionspendels, dessen Theorie von L. V. KING gegeben wurde, zur Messung absoluter Schallintensitäten stehender ebener Wellen in Flüssigkeiten insbes. Wasser sowie zur Eichung von Druckmikrophonen.

Der Strahlungsdruck auf ein Hindernis im Schallfeld, der durch die Nichtlinearität zwischen Druck und Dichte bedingt ist, wird zur Messung der Energiedichte herangezogen:

$$R_p = \frac{1}{2}(1+\gamma)\cdot E\,.$$

Eine richtige Messung ist nur möglich, wenn die Schallfeldstörung durch das Hindernis entweder zu vernachlässigen oder genau berechenbar ist. Einer Abhandlung von KING folgend, wird die Gesamtkraft auf eine Kugel mit dem Radius $a$ (Dichte $\varrho$) in einer Flüssigkeit (Dichte $\varrho_0$) für die Schallamplitude $A$ berechnet, wenn der Abstand vom nächsten Geschwindigkeitsknoten $h$ ist:

$$\overline{P} = \pi\,\varrho_0\,|A|^2\cdot\Delta\cdot\sin 2kh = 2\pi\,\overline{E}/k^2\cdot\Delta\cdot\sin 2kh\,;$$

dabei ist $\Delta$ eine Funktion von $\alpha = k\,a$ und $\varrho_0/\varrho$, welche in Besselfunktionen ausgedrückt und dargestellt wird. Für eine andere Form der Darstellung

$$\overline{P} = \pi\,a^2\cdot\overline{R}_p = \pi\,a^2\cdot\overline{E}\cdot\sigma\cdot\sin 2kh$$
$$(\text{wobei } \sigma = 2/\alpha^2\cdot\Delta)$$

wurde $\sigma$ von SIVIAN und O'NEIL (Bell Lab.) berechnet für $\varrho_0/\varrho = 0$ (gültig für Luft), während $\Delta$ und daraus $\sigma$ von KLEIN, SASULY und HEDINGER für $\varrho_0/\varrho = 1/8{,}8$ (gültig für Messing in Wasser) berechnet wird (Abb. 1). Für kleine $\alpha$ ist der Strahlungsdruck in stehenden, für große $\alpha$ in fortschreitenden Wellen der größere. $R_p$ ist in stehenden Wellen eine periodische Funktion von $h$ und immer kleiner als die Energiedichte $E$, da $\sigma < 1$. Im Geschwindigkeitsknoten wird:

$$\overline{P} = 2\pi\,\overline{E}/k^2\cdot\Delta\,.$$

Ist der Auslenkungswinkel $\delta$ des Systems mit der Torsionskonstanten $s$ bei einem Kugelabstand $l$ von der Drehachse, so ist die Energiedichte:

$$E = s\,\delta\,k^2/2\pi\,\Delta\,l = 2\pi\,s\delta/\lambda^2\,\Delta\,l \quad (\text{wobei } P\cdot l = s\,\delta)$$
$$(s_2\,l_1/s_1\,l_2)\;\delta_2/\delta_1 = \Delta_2/\Delta_1\,.$$

Bei gleicher Energiedichte kann durch Messung mit zwei verschiedenen Kugeln der theoretisch gefundene Wert $\Delta_2/\Delta_1$ mit dem gemessenen $\delta_2/\delta_1$ verglichen

werden, da der Wert der Klammer bekannt ist; er beträgt für die Versuchsanordnung 8,5.

Ein kolbenartig schwingender, nicht abgestimmter Quarz erzeugt in einem durch Verschieben des Quarzes abgestimmten, wassergefüllten starren Rohr ebene stehende Wellen. Die Rohrwand besteht zur Vermeidung von Wandschwingungen aus drei verschiedenen Schichten: Messing, Blei und Bronze. Eine starre Platte mit einer Bohrung zur Aufnahme des zu eichenden Mikrophons, das durch Verschieben auf Druckmaximum eingestellt wird, schließt das Rohr ab. Der Strahlungsdruck wird in der Rohrachse punktweise mit einer Kugeltorsionswaage gemessen: Ein Nickelröhrchen, das an einem Wolframfaden aufgehängt ist, trägt unten seitlich die Meßkugel ($^1/_4$'' bzw. $^1/_2$'') oben ein Gegengewicht und den Ablesespiegel. Zur Einstellung der Kugel im Schallfeld dient ein Torsionskopf.

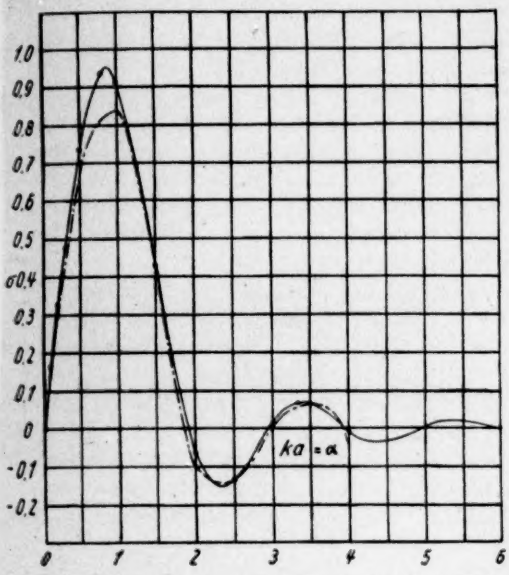



Abb. 1. Ausgezogen: Berechnung des Bell Labor
Strich-punktiert: $\sigma = 2\Delta/\alpha^2$ des Navy Research Labor

Die Versuchsbedingungen werden durch die Abhängigkeit der Mikrophonspannung und der Ablenkung vom Senderstrom (linear bzw. quadratisch) sowie durch den Einfluß der Stellung der Torsionswaage geprüft. Die gemessene Strahlungsdruckverteilung weicht etwas von der Sinusform ab. Die gemessenen Werte $8{,}5 \cdot \delta_2/\delta_1$ stimmen bei 25 und 50 kHz gut mit den theoretischen Werten $\Delta_2/\Delta_1$ überein, weichen jedoch bei 75 und 100 kHz bis zu 50% ab, was durch Eigenfrequenzen der Meßkugeln bedingt sein kann.

K. Tamm

Jan Arts, **The Sound of Bells.** J. Acous. Soc. Am. 9 (1938), S. 344—347.

Der Verfasser hat eine größere Anzahl Glocken untersucht und bei Geläuten die Intervalle zwischen einzelnen Glocken, die ja durch die Schlagtöne gegeben sind, bestimmt [s. auch Akust. Z. 2 (1937), S. 159]. Er hat dann versucht, diese Intervalle aus dem unter Zuhilfenahme von Stimmgabeln aufgenommenen Teiltonspektrum jeder einzelnen Glocke zu reproduzieren. Dabei ergab, sich, daß die gleichen Intervalle nur unter Verwendung der Oktave unter dem fünften Teilton, nicht aber durch Bildung des Differenztones zwischen dem fünften und dem siebenten Teilton erhalten werden konnten, woraus er den Schluß zieht, daß der Schlagton nicht durch Differenztonbildung zustande kommt.

Bemerkenswert für die Unsicherheit der Bestimmung der Schlagtöne ist, daß der Verfasser an zwei Glocken gleicher Abmessungen durch Einzelanschlag verschieden hohe Schlagtöne feststellte, wurden die Glocken aber zusammen geläutet so war es, „als ob nur eine Glocke geläutet würde", was gleiche Schlagtonhöhe voraussetzt.

Durch Versuche wird weiterhin festgestellt, daß es nicht möglich ist, Glockentöne durch Aufsetzen von Stimmgabeln sicher zu bestimmen, wenn diese eine Oktave oder eine Duodezime tiefer abgestimmt sind.

Bei seinen Untersuchungen ist der Verfasser auch auf einen bisher unbeobachteten Ton zwischen dem ersten und zweiten Teilton gestoßen. Dieser Ton läßt sich mit Stimmgabeln nicht hervorrufen, seine Tonhöhe ist aber durch Schwebungen genau bestimmbar. Seine Abklingzeit ist fast stets gleich der des dritten Teiltones, so daß der Verfasser einen Zusammenhang mit diesem vermutet. (Anm. d. Referenten: Es könnte sich hier um einen subjektiven Differenzton zwischen erstem und drittem Teilton handeln; die Frequenzabstände dieser Teiltöne und auch die Abklingzeiten scheinen dafür zu sprechen.)

Entgegen der Feststellung von P. Griesbacher kommt J. Arts zu dem Ergebnis, daß die Temperatur einen Einfluß auf den Glockenklang ausübt.

Gerhard Buchmann

Milton Cowan, **Pitch and Intensity Characteristics of Stage Speech.** Arch. of Speech. Suppl. December 1936. State University of Iowa.

Aus den Schallplattenaufnahmen zehn bekannter amerikanischer Schauspieler und -spielerinnen wurden Melodiekurven und Intensitätsschwankungen ausgewertet, um nähere Aussagen über die physiologischen Funktionen des Sprachmechanismus bei geschulter Sprechweise zu machen. Insgesamt waren dazu etwa 20000 Tonhöhen- und entsprechende Intensitätsmessungen notwendig. Die Tonhöhenkurven wurden mit einer Apparatur, die von Tiffin angegeben worden ist [J. Acous. Soc. Am. 5 (1934), S. 225], gewonnen, d. h. jede einzelne Periode wurde ausgemessen. Die Intensität wurde in db durch ein logarithmisches Röhrenvoltmeter direkt erhalten.

Beide Messungen wurden zu einem Schema vereinigt, das untereinandergeschrieben, den Tonhöhen- und Intensitätsverlauf enthält. 0,1 sec sind darauf noch abzulesen, die Tonhöhenskala ist in temperierte Halbtöne, die Intensitätsskala in 5 db unterteilt. Die Zuordnung des Textes findet an Hand des Intensitätsverlaufs durch die Silbenabtrennung statt. Aus der Fülle der Einzelergebnisse seien nur folgende Punkte angeführt. Die Tonhöhenbewegung findet bei männlichen und weiblichen Sprechern durchschnittlich innerhalb von zwei Oktaven statt. Die mittlere Stimmtonhöhe bei männlichen Sprechern lag bei 141 Hz und schwankte von 134—146 Hz bei den verschiedenen Sprechern. Das Mittel der weiblichen Stimmtonhöhe wurde zu 223 Hz bestimmt bei einer Schwankung von 199—295 Hz. Im Mittel weicht der Sprecher nicht mehr als 1,9, die Sprecherin um 1,6 Halbtöne von der mittleren Tonhöhe ab. Die Durchschnittsgeschwindigkeit betrug 157 Worte in der Minute. Im Maximum wurden 320 Worte pro Minute erreicht. Fallende Melodiebewegungen wurden viel häufiger angetroffen als steigende oder konstante, wobei die mittlere Tonhöhenbewegung beim Fallen zu 2,2 und beim Steigen zu 2,1 Halbtöne gemessen wurde. Beim Beginn von Sätzen traten natürlich meist Steigungen, am Schluß meist Fallen der Melodiekurve auf. Von allen Sätzen begannen 59% mit steigender, 17% mit fallender und 24% mit konstanter Melodie. Entsprechend endeten 63% mit fallender, 12% mit steigender und 25% mit konstanter Kurve. Weiterhin wurden folgende Folgerungen gezogen. Die dramatische Sprache unterscheidet sich von der gewöhnlichen durch ihren größeren Tonhöhenumfang. Die Art der Tonhöhenverteilung dagegen ist aber nicht in ein für die dramatische Sprechweise charakteristisches Schema zu bringen. Auch hier sind die Melodiekurven von Fall zu Fall verschieden. Allen Sprechern gemeinsam ist die geringere Schnelligkeit der Tonhöhenveränderung bei ruhigem Sprechen gegenüber der gehobenen Sprechweise, wobei 1—2 Oktaven in sehr kurzer Zeit überstrichen werden.

G. E. Morison, **Predetermination of Speech Levels in Auditoria with Coupled Spaces.** J. Acous. Soc. Am. 9 (1938), S. 244.

Eine wichtige Vorbedingung für gute Hörsamkeit ist — neben optimalen Nachhallverhältnissen — eine möglichst gleichmäßige Schallverteilung. Diese Frage wird in der vorliegenden Arbeit für Auditorien mit angekoppelten Nebenräumen untersucht, d. h. für Theaterräume oder Hörsäle, die eine vorgezogene Empore besitzen.

Die Vorausberechnung erfolgt in Analogie zur elektrischen Leitungstheorie. An der Emporenöffnung stoßen zwei „akustische Leitungen" zusammen, die wegen der verschiedenen Querschnitte auch verschiedene „Wellenwiderstände" haben. Es liegt die Annahme zugrunde, daß der Schall sich als ebene Welle von der Bühne her ausbreitet und bis zur Brüstung der Empore praktisch verlustlos fortschreitet. Das unter der Empore erzielte Schallstärkeniveau ist dann durch 4 Faktoren bestimmt: 1. Luftabsorption, 2. Reflexion an der Emporenöffnung (Stoßstelle beider „Leitungen"), 3. Wandabsorption von Fußboden (Bestuhlung bzw. Zuhörerschaft) und Decke (unterhalb der Empore), 4. Absorption an der Rückwand des Saales (unterhalb der Empore).

Es werden zwei Formeln abgeleitet, deren Auswertung mit praktischen Meßergebnissen übereinstimmt. Die eine Formel gibt den in Richtung der Schallausbreitung von der Entfernung abhängigen Schalldruckverlust in db an, und zwar im Vergleich zu dem an der Emporenöffnung vorhandenen Schalldruck. Die andere Formel dient zur Ermittlung des Absorptionskoeffizienten einer Emporenöffnung, wie er, multipliziert mit der ganzen Öffnungsfläche, bei der Berechnung der Nachhallzeit des Hauptraumes eingesetzt werden muß.

Da die genaue Bedeutung der in den Formeln benutzten Größen und — nicht zuletzt wegen der gleichzeitigen Verwendung von zwei verschiedenen Längeneinheiten (Fuß und cm) — die Richtigkeit der Dimension an manchen Stellen nicht ohne weiteres ersichtlich sind, soll von einer Wiedergabe dieser für den Architekten zweifellos sehr wertvollen Formeln hier Abstand genommen werden.

E. Thienhaus

J. J. Coop, **Tones Produced by a Wire Placed in an Ignited Gas Jet.** J. Acous. Soc. Am. 9 (1938), S. 321.

Die Arbeit befaßt sich mit der Untersuchung der Töne, die an Platindrähten in einem entzündeten Gasstrahl erzeugt werden. Das Gas strömt mit der regelbaren Geschwindigkeit $U$ durch eine Düse des Durchmessers $O$. Der Draht ist in der Strahlmitte senkrecht zur Strahlachse in genau einstellbarem Abstand $d$ von der Öffnung angebracht. Eine Verstärkung der Schallintensität wird erzielt durch einen zweiten Draht, der parallel zum tonerzeugenden strahlabwärts in der Mitte zwischen Strahlachse und -rand befestigt wird. Das vom zweiten Draht ausgestrahlte Licht (helle Rotglut) wird auf eine Photozelle geworfen, die eine weitere Verstärkung ermöglicht. Die Frequenz der Schwingungen hängt nicht von der Lage des zweiten Drahtes ab.

Ändert man die Strömungsgeschwindigkeit $U$ an der Öffnung, so setzt der Ton in einem eng begrenzten Geschwindigkeitsbereich mit dem Mittelwert $U_i$ ein bzw. aus. Oberhalb $U_i$ wächst die Tonfrequenz mit $U$ bis zu einem kritischen Punkt, an dem Subharmonische auftreten, und schließlich geht bei weiterer

Steigerung von $U$ das Tongemisch über in das charakteristische Rauschen.

In bezug auf $U_i$ liefern Messungen an Öffnungen und Drähten verschiedenen Durchmessers in den Bereichen etwa $0{,}09\text{ cm} \leq 0 \leq 0{,}18\text{ cm}$ und $0{,}05\text{ cm} \leq D \leq 0{,}10\text{ cm}$ für Abstände $d > 1\text{ cm}$ die einfache Beziehung $O\,U_i = k\,d/D + C$ ($k$ und $C$ konstant), wobei zu beachten ist, daß die Geschwindigkeit und die Viskosität am Draht ($U_i$ gemessen an der Öffnung) unbekannte Funktionen von $d$ sind. Dicht an der Öffnung wird $U_i$ nahezu unabhängig von $D$.

Der Zusammenhang zwischen der Tonfrequenz $N$ und den Größen $U$, $O$, $D$ und $d$ wird ermittelt, soweit es die experimentellen Schwierigkeiten zulassen. $N$ hängt für beliebige $d$ linear von $U$ ab; der Frequenzbereich zwischen Toneinsatz und Rauschen umfaßt bei festem $d$ etwa 2 Oktaven und verschiebt sich mit wachsendem $d$ nach tieferen Frequenzen. W. Kohlrausch fand für Spalttöne an kreisförmigen Düsen für die Produkte $O \cdot dN/dU$ nahe die gleichen Werte, die in der vorliegenden Arbeit für $D \cdot dN/dU$ gefunden werden für Drähte dicht an der Öffnung. Die Meßergebnisse liefern den Hinweis, daß bei gleicher Ausströmungsgeschwindigkeit in beiden Fällen nahe gleiche Frequenzen erhalten werden. Es ist zu bemerken, daß bei der brennenden Flamme Töne nur bei Vorhandensein eines Hindernisses auftreten. Für konstante Frequenz ergibt sich bei Änderung des Abstandes $d$ für $d > 1$ cm eine Beziehung der Form $U = K d^n$, wobei $n$ in der Nähe von 0,5 liegt ($U$ die Strömungsgeschwindigkeit an der Öffnung, $K$ konstant). Als Näherungsbeziehung zwischen $N$, $U$ und $d$ bei festen $O$ und $D$ wird angegeben $N = k\,U/d^{\frac{1}{2}} + C$ ($k$ und $C$ konstant).

Zur Klärung der Frage nach der Natur der im brennenden Gasstrahl erzeugten Töne wird hinter dem Draht ein dünnes Blech befestigt (Draht und Strahlrichtung in der Blechebene). Im Falle der Berührung von Draht und Blech tritt kein Ton auf. Erst wenn dieses in Stromrichtung vom Draht fortbewegt wird, setzt in einer bestimmten kritischen Entfernung, die in der Arbeit genauer untersucht wird, der Ton ein. Dieses Ergebnis weist darauf hin, daß die Töne durch Schwingungen in dem Strom unmittelbar hinter dem Draht erzeugt werden (keine Schneidentöne), und daß sie ihrer Natur nach ähnlich sind den von Strouhal, F. Krüger u. a. experimentell und theoretisch erforschten Hiebtönen. Zu beachten ist, daß bei den Hiebtönen das den Draht umströmende Medium unendlich ausgedehnt ist, während der in das ruhende Medium fließende Strahl eng begrenzt ist. Der im brennenden Gasstrahl beobachtete Ton entspricht nicht einer durch Wirbelablösung angeregten Eigenschwingung des Drahtes. Bei den vorliegenden Versuchen schwingt der Draht nicht, und Töne werden nur im brennenden Strahl wahrgenommen. Zur Deutung der Erscheinung wird angenommen, daß der beobachtete Ton zurückzuführen ist auf Miniaturexplosionen in den hinter dem Draht gebildeten Wirbeln, in denen ein für die Verbrennung günstiges Gasgemisch erzeugt wird. Es wird angenommen, daß die Wirkung des verstärkenden Drahtes auf einer erhöhten Durchmischung des Gases beim Auftreffen eines am ersten Draht gebildeten Wirbels auf den zweiten beruht.

Hermann Oberst

H. W. Lee, **The Scophony Television Receiver.** Nature 142 (1938), S. 59—62.

Die Beugung des Lichtes an Ultraschallwellen bietet die Möglichkeit, eine Lichtsteuerung nach Art der Kerrzelle durchzuführen; man unterdrückt das Beugungsbild erster Ordnung und modelt die den Ultraschallstrahler erregende Wechselspannung mit der Spannung für die Helligkeitssteuerung. Die obere Grenzfrequenz ist dabei durch die Aufbauzeit des beugenden Schallfeldes gegeben, die von der Schallgeschwindigkeit abhängt und bei den verwendeten Flüssigkeiten etwa 1000 m/s beträgt. Soll die Grenzfrequenz hoch liegen. so darf man aus dem Schallfeld nur eine kurze Strecke herausblenden. Die Folge ist ein Sinken der Lichtausbeute. Dieser Nachteil des Verfahrens, die endliche Aufbauzeit, ist für die Arbeitsweise der im britischen Fernsehen verwendeten Scophony-Empfänger wesentlich und stellt einen besonderen Vorteil dar.

Modelt man die Schallabstrahlung mit den Helligkeitsschwankungen, wie sie beim Abtasten eines Bildes auftreten, so werden diese in Schwankungen der Druckamplitude verwandelt, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten und die infolge der geringen Dämpfung in der Flüssigkeit und der guten Richtwirkung des Schallsenders solange erhalten bleiben, bis sie von einem gegenüber dem Sender befindlichen Schluckstoff absorbiert werden. Die Amplitudenverteilung des Schallgitters stellt also ein getreues Abbild der Helligkeitsunterschiede längs der abgetasteten Bildzeile dar. Das Schallgitter bewegt sich allerdings mit Schallgeschwindigkeit durch die Zelle; man arbeitet hier mit einem Zwischenfilmverfahren, bei dem die durch die Zelle laufenden Schallwellen als Schwärzungsträger dienen. Man bildet daher auch, analog dem Film, den Schwärzungsträger, d. h. das Schallgitter durch eine Zylinderoptik auf dem Schirm ab und sorgt durch einen optischen Ausgleich (Spiegelrad, das die Wanderung des Zeilenbildes aufhebt) dafür, daß die Helligkeitsunterschiede auf dem Schirm stillstehen. In dieser Weise wird Zeile für Zeile des Bildes abgetastet. Eine langsam rotierende Spiegeltrommel bewirkt den Vorschub um die Zeilenbreite.

Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, daß jedes Bildelement sein Licht nicht nur für die kurze Zeit erhält, in der es abgetastet wurde, sondern